



TUGAS AKHIR-RC14-1501

PREDIKSI LAJU SEDIMENTASI PADA TAMPUNGAN BENDUNGAN TUGU TRENGGALEK

FARADILLA AYU RIZKI SHIAMI
NRP.3113100090

Dosen Pembimbing I
Dr. techn. Umboro Lasminto, ST, M.Sc.

Dosen Pembimbing II
Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc

JURUSAN TEKNIK SIPIL
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR (RC-14-1510)

**PREDIKSI LAJU SEDIMENTASI PADA
TAMPUNGAN BENDUNGAN TUGU TRENGGALEK**

**FARADILLA AYU RIZKI SHIAMI
NRP 3113 100 090**

**Dosen Pembimbing
Dr.techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc.
Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc**

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT (RC-14-1510)

**SEDIMENTATION RATE PREDICTION IN TUGU
RESERVOIR, TRENGGALEK**

**FARADILLA AYU RIZKI SHIAMI
NRP 3113 100 090**

**Supervisor
Dr.techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc
Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc**

**DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
Faculty of Civil Engineering and Planning
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017**

**PREDIKSI LAJU SEDIMENTASI
PADA TAMPUNGAN BENDUNGAN TUGU
TRENGGALEK**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

pada

**Program Studi S-1 Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

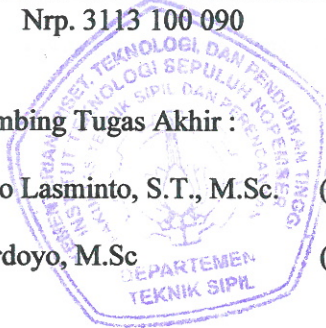
Oleh:

FARADILLA AYU RIZKI SHIAMI

Nrp. 3113 100 090

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Dr. techn. Umboro Lasminto, S.T., M.Sc. (.....)
2. Dr. Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc. (.....)



**SURABAYA
JULI, 2017**

PREDIKSI LAJU SEDIMENTASI PADA TAMPUNGAN BENDUNGAN TUGU TRENGGALEK

Nama Mahasiswa : Faradilla Ayu Rizki Shiami
NRP : 3113 100 090
Jurusan : Teknik Sipil FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : Dr.techn.Umboro Lasminto,S.T., M.Sc.
Dr.Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc.

Abstrak

Hal terpenting dalam perencanaan waduk selain desain hidrolis bendungan adalah sedimentasi. Sedimen yang mengendap di waduk merupakan faktor pembatas kapasitas tampungan efektif waduk, sehingga jumlah sedimen di waduk biasa digunakan untuk menetapkan masa guna waduk. Prediksi sedimentasi yang terjadi pada waduk dilakukan dengan memperhitungkan besar laju sedimentasi berdasarkan metode perhitungan analitik, namun untuk mempermudah dalam menggambarkan sedimentasi yang terjadi pada waduk dilakukan metode pemodelan menggunakan software HEC-RAS. Program HEC-RAS sendiri merupakan salah satu program pemodelan analisis angkutan sedimen pada saluran maupun sungai. Tujuannya adalah untuk memprediksi besar laju sedimentasi pada Waduk Tugu dengan metode perhitungan analitik dan pemodelan software HEC-RAS, kemudian kedua hasilnya dibandingkan.

Pada perhitungan maupun pemodelan sedimentasi menggunakan HEC-RAS data yang dibutuhkan adalah data geometri sungai, data hidrolika, debit sungai, dan parameter sedimen. Pemodelan sedimentasi dengan HEC-RAS dilakukan dengan mencoba beberapa model. Pemodelan pertama berupa sungai dan tubuh bendung. Pemodelan kedua dengan penambahan ambang pelimpah. Pemodelan ketiga, sungai yang dimodelkan hanya alur sungai bagian hilir. Pemodelan keempat penambahan culvert sebagai saluran pengambilan. Pemodelan

kelima dengan menambah lateral inflow pada hulu tubuh bendung sebagai alternatif lain untuk memodelkan saluran pengambilan. Pemodelan keenam sama dengan pemodelan keempat namun dengan debit inflow pertama yang didasarkan sebagai asumsi bahwa waduk terisi penuh baru dioperasikan. Perhitungan analitik dihitung dengan metode total load Laursen yang juga digunakan dalam pemodelan HEC-RAS dan dihitung pada penampang melintang bagian hulu.

Hasil perhitungan analitik berupa besar angkutan sedimen yang kemudian dibandingkan dengan pemodelan HEC-RAS. Angkutan sedimen hasil dari perhitungan analitik cenderung lebih kecil daripada hasil dari pemodelan HEC-RAS, dimana perkiraan besar laju sedimentasi dari metode pemodelan HEC-RAS sebesar $22.000 \text{ m}^3/\text{th}$ sedangkan laju sedimentasi hasil perhitungan analitik sebesar $19.400 \text{ m}^3/\text{th}$. hal ini dikarenakan penyederhanaan geometri penampang pada perhitungan analitik, sedangkan geometri pada model lebih detail.

Kata kunci : perhitungan analitik, sedimentasi, software HEC-RAS, waduk.

SEDIMENTATION RATE PREDICTION IN TUGU RESERVOIR, TRENGGALEK

Name : Faradilla Ayu Rizki Shiami
NRP : 3113 100 090
Department : Civil Engineering FTSP-ITS
Supervisor : Dr.techn.Umboro Lasminto,S.T., M.Sc.
Dr.Ir. Wasis Wardoyo, M.Sc.

Abstract

In dam's design, one of the most important things to be aware is not only the hydraulic design but also the sedimentation. Sediments that settle in the reservoirs are one of the limiting factors for the effective storage capacity of the reservoir, so that the amount of sediment in the reservoir is commonly used to calculate the reservoir's period. Sedimentation that occurs at the dam's reservoir is predicted by calculate the amount of sedimentation rate based on analytical calculation method, but to make it easier to describe sedimentation that happened in reservoir, is by using HEC-RAS software modeling. HEC-RAS program is a modeling program for the analysis of sediment transport on channels and rivers. The purpose is to predict the sedimentation rate at Tugu's Reservoir with analytical calculation method and HEC-RAS software modeling, then the two results are compared.

In the calculation and modeling of sedimentation using HEC-RAS data that needed are river geometry data, hydraulic data, river inflow, and sediment parameters. Sedimentation modeling with HEC-RAS is done by trying several models. The first modeling is river and main dam. Second modeling with the addition of the overflow threshold. Third modeling, the river is modeled only downstream river channel. The fourth model of adding culvert as a retrieval channel. The fifth modeling by adding lateral inflow on the upstream of the main dam as another alternative to modeling the retrieval channel. The sixth model is

the same as the fourth model but with the first inflow raised as an assumption that the reservoir fully charged before the reservoir is operated. Analytical calculations were calculated by the Laursen total load method, which is also used in HEC-RAS modeling and calculated on the upstream cross section.

The output of analytical calculations are the amount of sediment transport which is compared with the output of HEC-RAS modeling. Sediment transport load result from analytical calculation tends to be smaller than result of HEC-RAS modeling, where sedimentation rate estimation from HEC-RAS modeling method is 21,000 m³/year while sedimentation rate of analytical calculation result is 19,400 m³/year. This is due to the simplification of the cross section geometry of the analytic calculation, while the geometry of the model is more detailed.

Key word : analytical calculation, HEC-RAS program, reservoir, sedimentation.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah memberikan berkat, rahmat dan karunia – Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “Prediksi Laju Sedimentasi pada Tampungan Bendungan Tugu Trenggalek”. Dalam kesempatan ini penulis bermaksud mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang mendukung dan membantu atas terselesaikannya tugas akhir ini yaitu:

1. Bapak Dr. Techn. Umboro Lasminto, ST., M.Sc., dan Bapak Dr.Ir. Wasis Wardoyo,M.Sc, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang sudah meluangkan banyak waktu untuk memberikan bimbingan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
2. Departemen PU Balai Besar Wilayah Sungai Brantas Surabaya dan PPK Tulungagung yang telah memberikan data Tugas Akhir ini serta membimbing Penulis selama Kerja Praktik di Bendungan Tugu Trenggalek
3. Orang tua dan keluarga yang senantiasa memberikan doa dan dukungan.
4. Teman-teman CEITS 2013, Suku Air 2K13, dan sahabat lainnyayang telah banyak membantu dalam pembuatan Tugas Akhir ini.Khususnya terima kasih untuk Fira, Anna, Devy, Isti, dan Depe.
5. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu – persatu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak terdapat kekurangan dan kesalahan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun dari semua pihak untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini. Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat. Aamiin.

Surabaya, Juli 2017
Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
<i>TITLE PAGE</i>	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat	3
1.6 Peta Lokasi	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Analisis Hidrolika	7
2.2 Analisis Hidrologi	10
2.2.1. Data Hidrologi	10
2.2.2. Hidrolika pada Software HEC-RAS	11
2.3 Analisis Sedimentasi pada Bendungan	20
2.3.1. Laju Sedimentasi Muatan Melayang	23
2.3.2. Laju Sedimentasi Muatan Dasar	24
2.3.3. Laju Sedimentasi Muatan Total	25
2.3.4. Sedimentasi dengan Software HEC-RAS	27
2.4 Software HEC-RAS	35
BAB III METODOLOGI	45
3.1. Studi Literatur	45

3.2.	Pengumpulan Data	45
3.3.	Perumusan Konsep Pengerjaan.....	46
3.4.	Kesimpulan	47
3.5.	Diagram Alir	48
BAB IV PEMBAHASAN		49
4.1	Pemodelan HEC-RAS	49
4.1.1.	Data Geometri.....	50
4.1.1.1.	Pembuatan Alur Sungai	51
4.1.1.2.	Penampang Melintang Sungai	54
4.1.1.3.	Struktur Melintang Sungai.....	64
4.1.2.	Data Sediment.....	66
4.1.3.	Data <i>Quasi-Unsteady Flow</i>	72
4.1.4.	<i>Running Sediment Analysis</i>	78
4.1.5.	<i>Output Data</i>	80
4.1.6.	Pemodelan Pertama	80
4.1.7.	Pemodelan Kedua	80
4.1.8.	Pemodelan Ketiga.....	86
4.1.9.	Pemodelan Keempat	87
4.1.10.	Pemodelan Kelima.....	90
4.1.11.	Pemodelan Keenam	92
4.2	Perhitungan Analitik.....	95
4.3	Perbandingan Pemodelan HEC-RAS dengan Perhitungan Analitik.....	104
BAB V KESIMPULAN.....		109
5.1	Kesimpulan	109
5.2	Saran.....	112
DAFTAR PUSTAKA		113
LAMPIRAN.....		115
BIODATA		124

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Denah Rencana Bendungan Tugu Trenggalek.....	4
Gambar 1. 2 Potongan Memanjang Bendungan Tugu Trenggalek.....	4
Gambar 1. 3 Potongan Melintang Bendungan Tugu Trenggalek.....	5
Gambar 2. 1 Hidrolika Penampang Trapesium.....	10
Gambar 2. 2 Diagram aliran berubah beraturan.....	10
Gambar 2. 3 Pembagian tampang untuk keperluan hitungan kapasitas angkut	15
Gambar 2.4 Hitungan tinggi energi kinetik rata-rata di suatu tampang	15
Gambar 2. 5 Aliran Melalui Alur Utama dan Bantaran.....	19
Gambar 2. 6 Skema angkutan sedimen.....	21
Gambar 2. 7 Profil Tipikal Pengendapan Sedimen.....	22
Gambar 2. 8 Skema Kontrol Volume Sedimen dengan <i>Software</i> HEC-RAS.....	28
Gambar 2. 9 Perubahan dasar saluran standar (contoh).....	35
Gambar 2. 10 Layar Penetapan Folder Default Penyimpanan File Project.....	37
Gambar 2. 11 Layar Pengaturan Nilai <i>Default</i> Koefisien Ekspansi dan Konstraksi.....	38
Gambar 2. 12 Layar Pengaturan Sistem Satuan.....	39
Gambar 2. 13 Tampilan Geometri Data.....	39
Gambar 2. 14 Tampilan Setelah Memilih <i>Icon Cross Section</i>	40
Gambar 2. 15 Empat Tampang Lintang Inline Structure.....	42
Gambar 2. 16 Layar Editor Inline Structure	43
Gambar 2. 17 Profil Muka Air di Sepanjang Sungai.....	43
Gambar 3.1 Diagram Alir Prediksi Laju Sedimentasi pada Tampang Bendungan Tugu Trenggalek.....	48
Gambar 4. 1 Layar Utama <i>Software</i> HEC-RAS.....	49
Gambar 4. 2 Penyimpanan <i>File Project</i> HEC-RAS	49
Gambar 4. 3 Pemilihan Sistem Satuan HEC-RAS	50
Gambar 4. 4 Layar Utama <i>Geometric Data</i>	50
Gambar 4. 5 Pembuatan dan Penamaan Alur Sungai	51
Gambar 4. 6 Pembuatan dan Penamaan Cabang Alur Sungai	52

Gambar 4. 7 Konfirmasi Pembuatan Cabang Alur Sungai	52
Gambar 4. 8 Penamaan Alur Sungai Bagian Hilir	53
Gambar 4. 9 Penamaan Titik Cabang	53
Gambar 4. 10 Hasil Pembuatan Alur Sungai Keser	54
Gambar 4. 11 Kontur Aliran Sungai Keser Bendungan Tugu	54
Gambar 4. 12 Penggunaan <i>Software DXF2XYZ</i>	55
Gambar 4. 13 Kotak Editor <i>Configuration</i> Global Mapper	56
Gambar 4. 14 Kotak <i>Import Options</i>	56
Gambar 4. 15 Tampilan Kontur Sungai pada Global Mapper	57
Gambar 4. 16 Garis Potongan Penampang Sungai	58
Gambar 4. 17 Analisis <i>Path Profile</i> pada Global Mapper	58
Gambar 4. 18 Hasil <i>Path Profile</i> Salah Satu <i>Cross Section</i> Sungai	59
Gambar 4. 19 Penyimpanan <i>Cross Section</i> ke CSV File	59
Gambar 4. 20 Kotak Penamaan <i>River Station</i> dalam pembuatan potongan melintang Sungai Keser	61
Gambar 4. 21 Tampilan <i>Cross Section Data</i> Setelah <i>Input</i>	63
Gambar 4. 22 Tampilan Geometri Data Sungai Keser	63
Gambar 4. 23 Kotak Editor <i>Inline Structure Data</i>	64
Gambar 4. 24 Kotak Editor Data Geometri Bendungan	65
Gambar 4. 25 Tampilan <i>Geometric Data</i> Setelah <i>Input</i> Bendungan	66
Gambar 4. 26 Kotak Editor Sediment Data	67
Gambar 4. 27 Skema <i>Sorting and Armoring Methods</i> HEC-RAS	68
Gambar 4. 28 Editor <i>Bed Gradation</i>	69
Gambar 4. 29 Pengisian Kotak Editor <i>Initial Conditions and Transport Parameters</i>	70
Gambar 4. 30 Kotak <i>Sediment Boundary Condition Type</i>	71
Gambar 4. 31 Kotak Editor <i>Rating Curve</i>	71
Gambar 4. 32 Menyimpan File <i>Quasi-Unsteady Flow</i>	73
Gambar 4. 33 <i>Boundary Condition Quasi-Unsteady Flow</i> RS Hulu	73
Gambar 4. 34 Menambahkan Jumlah Data pada <i>Flow Series</i>	74
Gambar 4. 35 Kotak Editor <i>Flow Series</i>	75

Gambar 4. 36 <i>Hidrograph Plot Flow Series Data</i>	76
Gambar 4. 37 <i>Boundary Condition Quasi-Unsteady Flow RS Hilir</i>	76
Gambar 4. 38 <i>Quasi-Unsteady Flow Editor</i>	77
Gambar 4. 39 Kotak Editor <i>Temperature Series</i>	77
Gambar 4. 40 Kotak <i>Sediment Transport Analysis</i>	79
Gambar 4. 41 Kotak HEC RAS <i>Computations</i> setelah simulasi ..	79
Gambar 4. 42 Menu <i>View HEC-RAS</i>	80
Gambar 4. 43 <i>Profile Plot Reach 1</i> pada tahun ke 34.....	81
Gambar 4. 44 <i>Profile Plot Reach 2</i> pada tahun ke 34.....	81
Gambar 4. 45 <i>Profile Plot Reach 3</i> pada tahun ke 34.....	82
Gambar 4. 46 Penambahan pelimpah pada tubuh bendungan	83
Gambar 4. 47 Pelimpah pada kotak editor <i>Inline Structure Data</i> ..	83
Gambar 4. 48 <i>Profile Plot Reach 1</i> pada Tahun ke 34 Setelah Penambahan Pelimpah.....	84
Gambar 4. 49 <i>Profile Plot Reach 2</i> pada Tahun ke 34 Setelah Penambahan Pelimpah.....	85
Gambar 4. 50 <i>Profile Plot Reach 3</i> pada Tahun ke 34 Setelah Penambahan Pelimpah.....	85
Gambar 4. 51 Geometri pada Pemodelan Ketiga.....	86
Gambar 4. 52 <i>Profile Plot</i> tahun ke 34 dari Pemodelan Ketiga....	87
Gambar 4. 53 Menu <i>Culvert</i> pada Kotak <i>Inline Structure Data</i> ..	88
Gambar 4. 54 Kotak <i>Culvert Data Editor</i>	88
Gambar 4. 55 <i>Max Depth=0</i> pada Kotak Editor <i>Sediment Data</i> ..	89
Gambar 4. 56 <i>Profile Plot</i> Tahun ke-1 dari Pemodelan Keempat	89
Gambar 4. 57 <i>Profile Plot</i> Tahun ke-34 dari Pemodelan Keempat	90
Gambar 4. 58 <i>Input Lateral Flow Series</i> pada RS 13	91
Gambar 4. 59 Kotak Editor <i>Lateral Inflow Series</i>	91
Gambar 4. 60 <i>Profile Plot</i> Tahun ke-34 dari Pemodelan Kelima	92
Gambar 4. 61 Debit <i>Inflow</i> Pertama Diperbesar 100m ³ /Detik	93
Gambar 4. 62 <i>Profile Plot</i> Tahun ke-1 dari Pemodelan Keenam	93

Gambar 4. 63 <i>Profile Plot</i> Tahun ke-34 dari Pemodelan Keenam	94
Gambar 4. 64 Shield Diagram (Vanoni,1975)	96
Gambar 4. 65 Fungsi $f(U_*/\omega_i)$ berdasarkan Laursen	97
Gambar 4. 66 Hubungan ukuran diameter dan kecepatan jatuh ..	97
Gambar 4. 67 <i>Cross Section</i> RS 31	98
Gambar 4. 68 Mencari Kecepatan Jatuh	99
Gambar 4. 69 Mencari Tegangan Geser Kritis	101
Gambar 4. 70 Mencari nilai $f(U_*/\omega_i)$ pada Tahun 1976	101
Gambar 4. 71 Kotak <i>Sediment Plot</i>	104
Gambar 4. 72 Grafik Perbandingan Angkutan Sedimen per Tahun	106

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Data Bendungan Utama	7
Tabel 2. 2 Data Bangunan Pelimpah	8
Tabel 2. 3 Data Bangunan Pengambilan.....	9
Tabel 2. 4 Data Waduk	11
Tabel 2. 5 <i>Range input</i> data untuk persamaan angkutan sedimen	31
Tabel 2. 6 Klasifikasi Ukuran Partikel.....	34
Tabel 4. 1 Jarak dan Elevasi RS 31	60
Tabel 4. 2 Daftar LOB, Channel, dan ROB Sungai Keser	62
Tabel 4. 3 Data Debit dan Total Angkutan Sedimen	72
Tabel 4. 4 Konsentrasi dan Debit Angkutan Sedimen.....	103
Tabel 4. 5 Perbandingan Angkutan Sedimen dalam ton.....	105

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bendungan merupakan salah satu prasarana pengembangan sumber daya air yang banyak dikembangkan di Indonesia. Sebuah waduk selain difungsikan sebagai *reservoir*, juga dapat difungsikan sebagai bangunan pengairan, pembangkit listrik tenaga air, pengendali banjir dan pariwisata. Bendungan Tugu sendiri dibangun pada aliran Sungai Keser, Kabupaten Trenggalek, yang mempunyai potensi bencana banjir. Belum adanya suatu bangunan pengendali air berakibat pada sumber air sangat melimpah di saat musim hujan dan sebaliknya sulitnya mencari air di saat musim kemarau sehinggasinggerterjadi kekeringan. Kurangnya sarana sumber air, khususnya berupa *reservoir* (tampungan air) menyebabkan potensi sumber air belum bisa dimanfaatkan secara optimal. Selain itu, Bendungan Tugu bertujuan sebagai penyedia sumber air baku untuk berbagai keperluan (air minum, irigasi, rumahtangga, dll.) yang memenuhi persyaratan baik secara kuantitas maupun kualitasnya. Dari segi lingkungan, dengan adanya waduk maka bisa menjadi lokasi konservasi air dan menjaga kelestarian hayati. Pembangunan Bendungan Tugu juga bermanfaat sebagai tujuan pariwisata yang berpotensi besar karena berada di jalur nasional yang menghubungkan Trenggalek dan Ponorogo.

Perencanaan bendungan selain desain hidrolis bendungan salah satu hal penting yang harus diperhatikan adalah sedimentasi. Konsekuensi dari penampungan air sungai adalah ikut tertampungnya sedimen yang terbawa oleh air. Sedimen yang mengalir di sungai tersebut terbagi menjadi dua yaitu berupa koloidal (butir halus) yang bercampur dengan air sungai (*suspended load*) dan berupa butir yang mengalir lewat dasar sungai (*bed load*) (Soedibyo, 1987). Sedimen yang mengendap di waduk merupakan salah satu faktor pembatas kapasitas tampungan efektif waduk, sehingga jumlah sedimen di waduk

biasa digunakan untuk menetapkan masa guna waduk. Perkiraan masa guna waduk ini dianalisis dengan memprediksi laju sedimentasi pada waduk yang dipengaruhi oleh kondisi fisiografi, hidroklimatologi daerah tangkapan.

Prediksi laju sedimentasi yang terjadi pada tampungan bendungan dapat dilakukan dengan metode angkutan sedimen secara analitik, namun diperlukan pula suatu metode untuk mempermudah dalam menggambarkan sedimentasi yang terjadi. Salah satu metode untuk memprediksi sedimentasi pada bendungan adalah penggunaan *software* seperti HEC-RAS. Program HEC-RAS merupakan salah satu program pemodelan analisis hidrolika aliran pada saluran maupun sungai. HEC-RAS memiliki empat perhitungan hidrolika satu dimensi yaitu 1) Hitungan Profil Muka Air Aliran Permanen, 2) Simulasi Aliran Tidak Permanen, 3) Hitungan Transpor Sedimen, 4) Analisis Kualitas Air, sehingga dengan *software* ini dapat dimodelkan sedimentasi pada tampungan bendungan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa prediksi laju sedimentasi pada tampungan Bendungan Tugu ?
2. Bagaimana memodelkan sedimentasi yang terjadi di tampungan Bendungan Tugu dengan *software* HEC-RAS?
3. Bagaimana perbandingan laju sedimentasi antara hasil perhitungan analitik dengan pemodelan HEC-RAS?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memprediksi laju sedimentasi pada tampungan Bendungan Tugu.
2. Memodelkan sedimentasi yang terjadi pada tampungan Bendungan Tugu dengan *software* HEC-RAS.
3. Membandingkan laju sedimentasi yang terjadi pada Bendungan Tugu berdasarkan perhitungan analitik dengan pemodelan *software* HEC-RAS.

1.4 Batasan Masalah

Yang menjadi batasan masalah dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

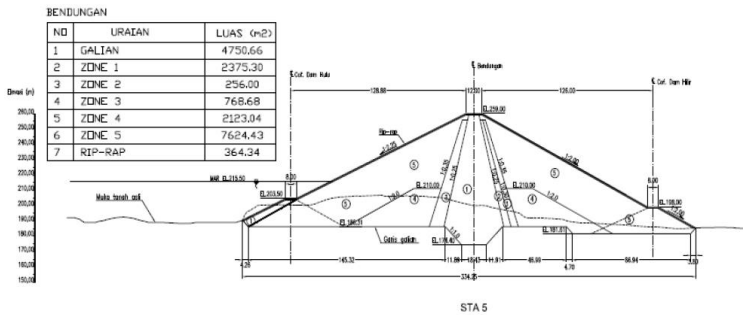
1. Tidak memperhitungkan bangunan pengelak, *intake* dan *spillway*.
2. Tidak menghitung struktur dan stabilitas bendungan.
3. Tidak membahas mengenai metode pelaksanaan dan ekonomi teknik.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan diperoleh dari penulisan tugas akhir ini antara lain:

1. Bagi penulis sebagai syarat pengajuan tugas akhir bidang hidroteknik dan mampu untuk memprediksi laju sedimentasi pada tampungan bendungan baik dengan perhitungan analitik maupun pemodelan dengan *software* HEC-RAS.
2. Bagi pembaca, sebagai referensi dalam memprediksi besar laju sedimentasi pada tampungan bendungan.
3. Bagi instansi terkait yaitu Pemerintah Daerah dan Balai Besar Wilayah Sungai Brantas di bawah Kementerian Pekerjaan Umum, sebagai bahan referensi dalam perencanaan bendungan.

Gambar 1. 2 Potongan Memanjang Bentungan Tugu Trenggalek
(Sumber: Balai Besar Wilayah Sungai Brantas, 2010)



Gambar 1. 3 Potongan Melintang Bendungan Tugu Trenggalek
(Sumber: Balai Besar Wilayah Sungai Brantas, 2010)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Analisis Hidrolika

Data Bendungan Tugu diperlukan dalam memasukkan *geometry data* pada *software* HEC-RAS. Elevasi puncak bendungan ditentukan berdasarkan tinggi muka air banjir diatas ambang pelimpah ditambah dengan tinggi jagaan. Dari perhitungan oleh konsultan perencana, didapatkan data elevasi puncak bendungan sebagaimana berikut ini :

Tabel 2. 1 Data Bendungan Utama

No	Keterangan	Bendungan Utama
1	Tipe Bendungan	Urugan batu random inti tegak
2	Elevasi Puncak	El. 259,00
3	Tinggi Bendungan	81 m
4	Lebar Puncak	12 m
5	Kemiringan Hulu	1: 2,25
6	Kemiringan Hilir	1: 2
7	Panjang Tubuh Bendungan	437. 27 m
8	Dasar Sungai	El. 177

(Sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Brantas,2010)

Bangunan pelimpah berfungsi mengalirkan air banjir yang menyebabkan naiknya muka air waduk untuk menghindarkan dari bahaya *over topping*. Secara umum bangunan pelimpah terdiri dari saluran pengarah, pelimpah, saluran peluncur dan pemecah energi. Untuk saluran pengarah dan saluran peluncur direncanakan harus mampu menampung debit banjir maksimum sehingga elevasi muka air banjir di *reservoir* tetap terkendali, sementara saluran pemecah energi direncanakan mampu untuk melindungi dasar sungai, tebing dan fasilitas lainnya. Penentuan tipe bangunan pelimpah harus mempertimbangkan banyak faktor yaitu kondisi geologi, topografi, segi keamanan, sosial ekonomi,

cara operasi pemeliharaan dan juga bendungan itu sendiri. Berdasarkan pertimbangan bentuk topografi pada as bendungan, dimana pada tebing kiri merupakan tebing yang terjal sedangkan di tebing kanan relatif lebih landai, maka posisi bangunan pelimpah direncanakan pada tebing sebelah kanan. Ambang pelimpah hasil dari perhitungan optimasi terletak pada Elevasi +251,00 dan menggunakan tipe Ogee. Ambang pelimpah direncanakan mampu melewati debit banjir dengan kala ulang 1000 tahun (Q_{1000}) yang diregulasi oleh waduk dengan kontrol debit PMF (Q_{PMF}). Berikut merupakan data teknis perencanaan bangunan pelimpah dari Bendungan Tugu :

Tabel 2. 2 Data Bangunan Pelimpah

No	Keterangan	Bangunan Pelimpah
1	Tipe Pelimpah	Pelimpah samping tanpa pintu
2	Elevasi Ambang	El. 251,00
3	Lebar Ambang	22 m
4	Elevasi Sal. Pengarah	El. 249
5	Lebar Sal Transisi	16 m
6	Panjang Sal. Transisi	115 m
7	Lebar Saluran Peluncur	16 m
8	Panjang Sal. Peluncur	235.75 m
9	Lebar Peredam Energi	16 m
10	Panjang Peredam Energi	40 m
11	Elevasi Peredam Energi	El.164

(Sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Brantas, 2010)

Bangunan pembawa aliran mempunyai dua fasilitas, masing-masing fasilitas pengambilan dan fasilitas pengeluaran yang berfungsi sebagai fasilitas suplai air irigasi, air baku, PLTMH, dan pengendalian banjir. Struktur outlet terdiri dari bangunan pengambilan (*intake*), saluran conduit pembawa aliran dan bangunan pengeluaran berupa bangunan pintu irigasi yang menjadi satu dengan *powerhouse* dan saluran pembawa kembali

ke sungai. Untuk saluran pembawa aliran memanfaatkan conduit pengelak yang sudah ada. Bangunan pengambilan direncanakan berbentuk *tower* tenggelam persegi empat yang dipilih dengan pertimbangan teknis dan ekonomi. Elevasi ambang bangunan pengambilan adalah pada El 215,50 m.

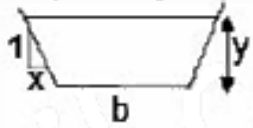
Saluran pembawa aliran memanfaatkan conduit pengelak. Panjang saluran pembawa aliran ini 340 m, berada di sebelah kanan bendungan yang fungsinya untuk pembawa air irigasi dan air baku dari inlet ke outlet. Saluran pembawa ini terdiri dari box conduit beton berukuran 3,20 m x 3,20 m dengan panjang 127 m dan pipa baja diameter 1,20 m sepanjang 212,80 m berada di tengah salah satu conduit.

Tabel 2. 3 Data Bangunan Pengambilan

No	Keterangan	Bangunan Pelimpah
1	Tipe Intake	Menara tenggelam
2	Dimensi Intake	1,50 x 1,50 m
3	Tinggi Intake	23,30 m
4	Elevasi Pengambilan	El. 215,50 m
5	Tipe Saluran Pengambilan	Pipa Baja
6	Diameter	1,20 m
7	Debit maksimum	1,93 m ³ /detik
8	Debit rencana	0,70 m ³ /detik

(Sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Brantas, 2010)

Perhitungan hidrolika dasar dari suatu penampang trapesium (Gambar 2.1) digunakan persamaan berikut:



Gambar 2. 1 Hidrolika Penampang Trapesium

(Sumber: Ven Te Chow, 1997)

$$Q = \frac{V}{A} \quad (2.1)$$

$$V = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (2.2)$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{(b+xy)y}{b+2y\sqrt{x^2+1}} \quad (2.3)$$

Dimana

- Q = debit aliran (m³/detik)
- V = kecepatan aliran (m/detik)
- A = luas penampang basah (m²)
- R = jari-jari hidrolis (m)
- S = kemiringan
- P = keliling basah (m)
- n = koefisien Manning
- b = lebar dasar penampang saluran (m)
- x = kemiringan tebing penampang
- y = kedalaman basah (m)

Untuk saluran lebar sekali dimana $b > 6y$ besar R (jari-jari hidrolis) sama dengan y (kedalaman basah).

2.2 Analisis Hidrologi

2.2.1. Data Hidrologi

Analisis hidrologi pada perencanaan bendungan dilakukan dengan tujuan memperoleh debit andalan dan banjir rencana sehingga dapat direncanakan dimensi bendungan. Analisa hidrologi terdiri dari perhitungan curah hujan rencana, analisa distribusi efektif, uji kecocokan distribusi hujan, analisa curah hujan efektif, perhitungan hidrograf, lengkung kapasitas waduk, analisa debit andalan, analisa kebutuhan air baku, kapasitas efektif, dan perhitungan *flood routing*. Analisis hidrologi pada tugas akhir ini telah dilakukan oleh konsultan perencana proyek Bendungan Tugu yaitu PT.Indra Karya Persero, sehingga data yang digunakan telah berupa debit andalan dan debit banjir rencana.

Tabel 2. 4 Data Waduk

No	Keterangan	Bendungan Utama
1	Debit rata-rata tahunan	1,33 m ³ /detik
2	Muka Air Normal	El. 239
3	Muka Air Rendah	El. 202,35
4	Kapasitas Tampungan Bruto	9,30 x 10 ⁶ m ³
5	Kapasitas Tampungan Efektif	7,68 x 10 ⁶ m ³
6	Kapasitas Tampungan Mati	1,62 x 10 ⁶ m ³
7	Luas daerah genangan	41,70 ha

(Sumber : Balai Besar Wilayah Sungai Brantas, 2010)

2.2.2. Hidrolika pada Software HEC-RAS

Menurut Ven te Chow (1997), saluran terbuka menurut asalnya dapat dibedakan menjadi saluran alam (*natural*) dan saluran buatan (*artificial*). Saluran alam meliputi semua alur air yang terdapat secara alami di bumi, mulai dari anak sungai di pegunungan, sungai besar sampai dengan muara sungai. Sementara itu, saluran buatan dibentuk oleh manusia, seperti saluran banjir, dan saluran irigasi. Aliran saluran terbuka diklasifikasikan menjadi dua yaitu:

1. Aliran permanen (*steady flow*)
 - a. Seragam (*uniform*)
 - b. Berubah (*non-uniform*)
 - Berubah lambat laun (*gradually*)
 - Berubah tiba-tiba (*rapidly*)
2. Aliran tidak permanen (*unsteady flow*)
 - a. Seragam (*uniform*)
 - b. Berubah (*non-uniform*)
 - Berubah lambat laun (*gradually*)
 - Berubah tiba-tiba (*rapidly*)

Hitungan hidrolika aliran pada dasarnya adalah mencari kedalaman dan kecepatan aliran di sepanjang alur yang ditimbulkan oleh debit yang masuk ke dalam alur dan kedalaman aliran di batas hilir. Hitungan hidrolika aliran di

dalam HEC-RAS dilakukan dengan membagi aliran ke dalam dua kategori, yaitu aliran permanen dan aliran tak permanen. HEC-RAS menggunakan metode hitungan yang berbeda untuk masing-masing kategori aliran tersebut.

Persamaan aliran permanen

Untuk aliran permanen, HEC-RAS memakai persamaan energi kecualidi tempat-tempat yang kedalaman alirannya melewati kedalaman kritis. Di tempat terjadi loncat air, pertemuan alur, dan aliran dangkal melalui jembatan, HEC-RAS memakai persamaan (kekekalan) momentum. Di tempat terjadi terjunan, aliran melalui peluap, dan aliran melalui bendung, HEC-RAS memakai persamaan-persamaan empiris.

a. Persamaan Energi

Program HEC-RAS menghitung profil muka air di sepanjang alur beurutan dari satu tampang lintang ke tampang lintang berikutnya. Muka air dihitung dengan persamaan energi dengan metode yang dikenal sebagai *standard step method*. Persamaan energi antara dua tampang lintang dituliskan dalam bentuk berikut:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (2.4)$$

dimana:

Y_1, Y_2 = kedalaman aliran,

Z_1, Z_2 = elevasi dasar saluran,

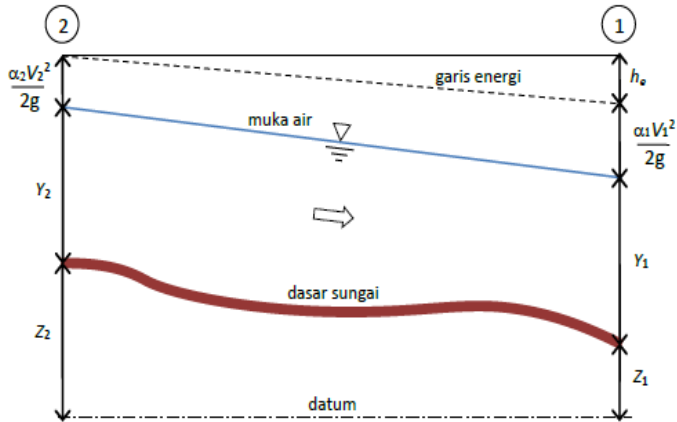
V_1, V_2 =kecepatan rata-rata (debit per luas tampang basah)

α_1, α_2 = koefisien,

g = percepatan gravitasi,

h_e = kehilangan tinggi energi.

Kedalaman aliran diukur ke arah vertical, dengan konsekuensi bahwa hitungan profil muka air dengan HEC-RAS hanya cocok untuk alur sungai yang memiliki kemiringan dasar kecil sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Diagram aliran berubah beraturan
(Sumber: Istiarto, 2014)

b. Kehilangan Tinggi Energi

Kehilangan tinggi energi, h_e , di antara dua tampang lintang terdiri dari dua komponen, yaitu kehilangan energi karena gesekan (*friction losses*) dan kehilangan energi karena perubahan tampang (*contraction or expansion losses*). Kehilangan energi antara tampang 2 dan 1 dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$h_e = L \cdot S_f + C \left| \frac{\alpha_2 \cdot V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} \right| \quad (2.5)$$

Dalam persamaan di atas,

L = panjang ruas sungai antar kedua tampang yang diberi bobot menurut debit

S_f = kemiringan gesekan (*friction slope*) antar kedua tampang

C = koefisien kehilangan energi akibat perubahan tampang

Panjang ruas sungai antar dua tampang (jarak sepanjang bentang), L , dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$L = \frac{L_{lob} \cdot Q_{lob} + L_{ch} \cdot Q_{ch} + L_{rob} \cdot Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}} \quad (2.6)$$

Dimana

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} = jarak sepanjang potongan melintang pada aliran yang ditinjau di pinggir kiri sungai / left overbank (Lob), saluran utama / main channel (ch) , dan pinggir kanan sungai/right overbank (rob).

Q_{lob}, Q_{ch}, Q_{rob} = jarak sepanjang potongan melintang pada aliran yang ditinjau di pinggir kiri sungai (lob), saluran utama (ch), dan pinggir kanan sungai (rob)

c. Kapasitas Angkut Tampang

Kapasitas angkut dan kecepatan rata-rata di suatu tampang dihitung dengan membagi tampang menjadi beberapa bagian; di setiap bagian, kecepatan terbagi merata. Bagian-bagian tersebut dikelompokkan menjadi tiga alur yaitu alur bantaran kiri (*left overbank*), alur utama (*main channel*), dan alur bantaran kanan (*right overbank*). Alur kiri ataupun kanan dapat terdiri dari beberapa bagian, sedangkan alur utama umumnya terdiri dari satu bagian tampang. Satu nilai koefisien Manning n ditetapkan di setiap bagian tampang tersebut. Di setiap bagian tampang, kapasitas angkut dihitung dengan memakai persamaan Manning berikut:

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (2.7)$$

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (2.8)$$

Dalam persamaan tersebut,

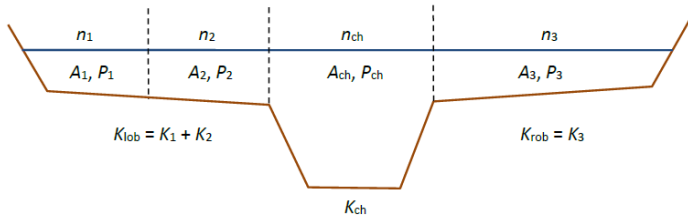
K = kapasitas angkut tiap bagian tampang,

n = koefisien kekasaran Manning tiap bagian tampang,

A = luas tampang basah tiap bagian tampang,

R = radius hidraulik tiap bagian tampang.

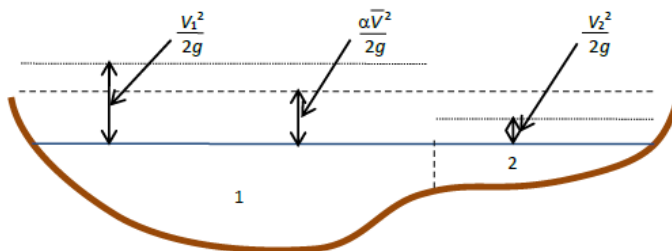
Kapasitas angkut total suatu tampang adalah jumlah kapasitas angkut seluruh bagian tampang ditunjukkan oleh Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2. 3 Pembagian tampang untuk keperluan hitungan kapasitas angkut
(Sumber: Istiarto, 2014)

d. Tinggi Energi Kinetik Rata-Rata

Karena HEC-RAS adalah model satu-dimensi, maka walaupun suatu tampang lintang dikelompokkan ke dalam beberapa bagian, namun hanya ada satu muka air di tampang lintang tersebut. Dengan demikian, di satu tampang hanya ada satu nilai tinggi energi kinetik (rata-rata). Untuk satu muka air, tinggi energi kinetik rata-rata dihitung dengan merata-ratakan tinggi energi kinetik di ketiga bagian tampang (*left overbank*, *main channel*, *right overbank*) yang diberi bobot berdasarkan debit di setiap bagian tampang. Gambar 2.4 menunjukkan contoh hitungan tinggi energi kinetik rata-rata di sebuah tampang yang dibagi menjadi *right overbank* dan *main channel* (tidak ada *left overbank*).



Gambar 2. 4 Hitungan tinggi energi kinetik rata rata di suatu tampang
(Sumber: Istiarto, 2014)

Untuk menghitung tinggi energi kinetik rata-rata, diperlukan koefisien tinggi kecepatan yang dihitung dengan cara sebagai berikut:

tinggi energi kinetik rata-rata = tinggi kecepatan yang diberi bobot sesuai dengan debit

$$\alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (2.9)$$

Dengan demikian

$$\alpha = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2) V^2} \quad (2.10)$$

atau pada umumnya

$$\alpha = \frac{|Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 \dots + Q_n V_n^2|}{Q V^2} \quad (2.11)$$

e. Hilang Karena Gesekan

Kehilangan energi akibat gesekan (*friction loss*) merupakan perkalian antara kemiringan garis energi karena gesekan (*friction slope*), S_f , dan panjang ruassungai antara dua tampang, L . Kemiringan garis energi karena gesekan (*friction slope*) di suatu tampang dihitung dengan persamaan Manning.

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad (2.12)$$

Selain persamaan di atas, HEC-RAS memiliki opsi beberapa persamaan lain untuk menghitung *friction slope*.

Kapasitas Angkut Rata-Rata

$$S_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (2.13)$$

Friction Slope Rata-Rata

$$S_f = \frac{S_{f1} + S_{f2}}{2} \quad (2.14)$$

Friction Slope Rata-Rata Geometrik

$$S_f = \sqrt{S_{f1} \times S_{f2}} \quad (2.15)$$

Friction Slope Rata-Rata Harmonik

$$S_f = \frac{2(S_{f1} \times S_{f2})}{S_{f1} + S_{f2}} \quad (2.16)$$

f. Koefisien Persempitan dan Perlebaran Tampang
Koefisien kehilangan energi karena kontraksi dan ekspansi dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$h_e = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (2.17)$$

Dalam persamaan tersebut C adalah koefisien kontraksi atau ekspansi.

HEC-RAS menganggap aliran melewati kontraksi (persempitan tampang) apabila tinggi kecepatan hilir lebih besar daripada tinggi kecepatan hulu. Sebaliknya, ketika tinggi kecepatan hulu lebih besar daripada tinggi kecepatan hilir, HEC-RAS menganggap aliran melewati ekspansi (perlebaran tampang).

Persamaan aliran tak permanen

Untuk aliran tak permanen, HEC-RAS memakai persamaan kekekalan massa (*continuity, conservation of mass*) dan persamaan momentum.

a. Persamaan Dasar

Aliran di saluran atau sungai merupakan proses fisik yang mengikuti hukum kekekalan massa dan kekekalan momentum. Proses fisik ini dapat digambarkan dengan persamaan matematis, yang dikenal sebagai Persamaan St. Venant. Persamaan St. Venant terdiri dari persamaan kontinuitas (prinsip konservasi massa) dan persamaan momentum (prinsip konservasi momentum), yang dituliskan dalam bentuk persamaan diferensial parsial sebagai berikut:

Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_\ell = 0 \quad (2.18)$$

Persamaan Momentum

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} - gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (2.19)$$

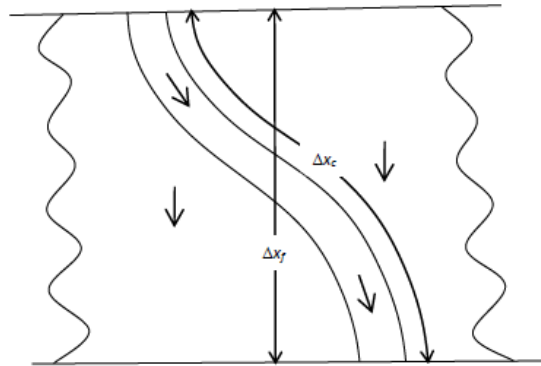
Arti notasi variabel dalam dua persamaan di atas adalah:

A = luas total tampang aliran (jumlah luas tampang aliran di *main channel* dan *overbank channel*),

Q	=	debit aliran,
q _l	=	debit lateral per satuan panjang,
V	=	kecepatan aliran,
g	=	percepatan gravitasi,
x	=	jarak, diukur searah aliran,
z	=	elevasi muka air,
t	=	waktu,
S _f	=	kemiringan garis energi (<i>friction slope</i>), dihitung dengan Persamaan Manning
$S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^2} \quad (2.17)$		
n	=	Koefisien kekasaran <i>Manning</i>
R	=	radius hidraulik

b. Penerapan Persamaan Aliran Tak Permanen

HEC-RAS membagi alur saluran menjadi tiga bagian, yaitu bantaran kiri, alur utama, dan bantaran kanan seperti diilustrasikan pada Gambar 2.5. Saat air sungai naik, air bergerak menyamping, menjauh dari alur utama, menggenangi bantaran dan mengisi tampungan-tampungan yang ada di sepanjang bantaran. Seiring dengan kenaikan muka air lebih lanjut, air di bantaran mulai mengalir ke hilir; aliran di bantaran ini umumnya menempuh jarak yang lebih pendek daripada aliran di alur utama. Saat air mulai surut, air di bantaran bergerak menuju alur utama, menggantikan aliran di alur utama. Karena arah utama aliran adalah sepanjang alur utama, aliran dua dimensi ini sering dapat didekati dengan anggapan aliran satu dimensi. Kawasan genangan di luar alur utama dapat dimodelkan sebagai kawasan tampungan yang airnya dapat saling berpindah ke dan dari alur utama. Aliran di bantaran dapat didekati sebagai aliran melalui alur terpisah dari alur utama.



Gambar 2. 5 Aliran Melalui Alur Utama dan Bantaran
(Sumber: Istiarto, 2014)

Berbagai cara telah dilakukan untuk memodelkan permasalahan aliran melalui alur utama dan bantaran. Salah satu cara adalah pengabaian kapasitas angkut bantaran dan menganggap bahwa bantaran hanya berfungsi sebagai tampungan. Cara ini cocok untuk sungai-sungai besar yang alurnya dibatasi tanggul dan bantarannya merupakan kawasan bervegetasi lebat atau merupakan sebuah kawasan tampungan (*off-channel storage*). Cara HEC-RAS memodelkan aliran di bantaran didasarkan pada metode yang awalnya dikembangkan oleh Fread (1976) dan Smith (1978), yang kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh Barkau (1982). Secara garis besar, metode ini dipaparkan di bawah ini.

Fread (1976) dan Smith (1978) memandang aliran melalui alur utama dan melalui bantaran sebagai dua aliran yang melewati dua tampang saluran terpisah serta menuliskan persamaan kontinuitas dan persamaan momentum untuk masing-masing tampang tersebut. Penyederhanaan dilakukan dengan menganggap muka air di kedua tampang saluran pada arah lateral (tegak lurus arah aliran) datar atau horizontal. Dengan demikian: 1) transfer momentum di antara kedua tampang dapat diabaikan,

dan 2) debit terbagi ke kedua tampang berdasarkan kapasitas angkut (*conveyance*) masing-masing tampang yaitu:

$$Q_c = \phi Q \quad (2.18)$$

Arti notasi variabel dalam persamaan di atas adalah:

Q_c	= debit aliran melalui alur utama (<i>channel</i>),
Q	= debit total aliran,
ϕ	= $K_c / (K_c + K_f)$
K_c	= kapasitas angkut tampang alur utama,
K_f	= kapasitas angkut tampang bantaran.

Dengan anggapan tersebut, maka persamaan aliran satu dimensi dapat digabungkan menjadi satu kelompok persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(\phi Q)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\phi)Q]}{\partial x_f} = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\phi^2 Q^2 / A_c)}{\partial x_c} + \frac{\partial[(1-\phi)^2 Q^2 / A_f]}{\partial x_f} + g A_c \left(\frac{\partial z}{\partial x_c} + S_{fc} \right) + g A_f \left(\frac{\partial z}{\partial x_f} + S_{ff} \right) = 0 \quad (2.20)$$

Dalam kedua persamaan di atas, subskrip *c* mengacu pada alur utama dan subskrip *f* mengacu pada bantaran. Persamaan di atas dijabarkan dengan pendekatan beda hingga implisit dan persamaan yang diperoleh diselesaikan dengan cara iterasi Newton-Raphson.

2.3 Analisis Sedimentasi pada Bendungan

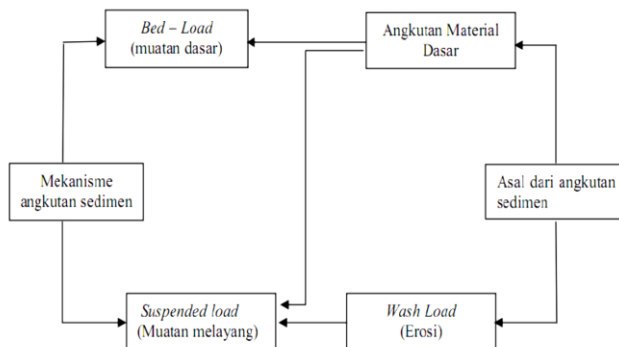
Sedimentasi adalah partikel padat yang digerakkan oleh fluida (Einstein, 1964), sedangkan menurut Manan (1979) sedimentasi adalah proses pengendapan dari bahan organik dan anorganik yang tersuspensi di dalam air dan diangkut oleh air. Pada daerah aliran sungai, partikel dan unsur hara yang larut dalam aliran permukaan, akan mengalir ke sungai dan waduk sehingga terjadi pendangkalan pada daerah tersebut yang

kemudian menyebabkan daya tampung sungai dan waduk menurun serta kesuburan tanah dihilu berkurang.

Sedimen sendiri dapat dibedakan berdasarkan asal angkutannya dan mekanisme pengangkutannya sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.6 Skema angkutan sedimen. Sedimen pada sungai dibagi menjadi dua berdasarkan asalnya (Overbeek,1979: Linsley et al.,1982), yaitu

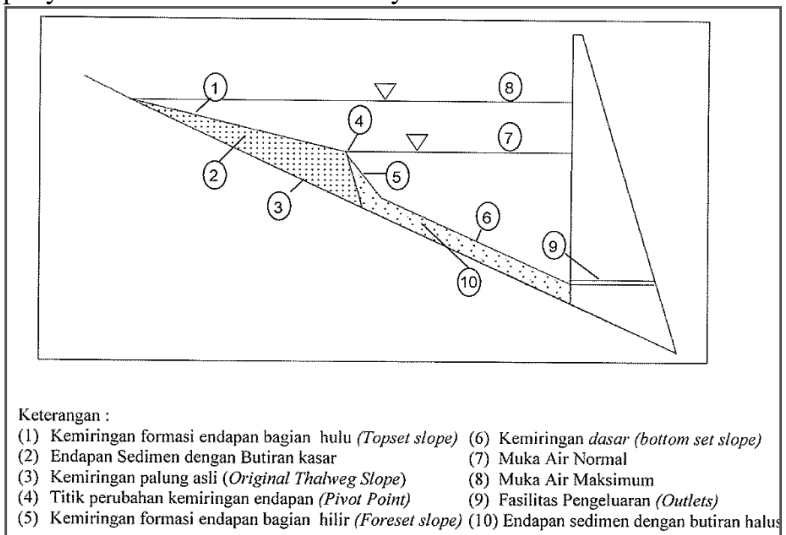
1. Angkutan sedimen dasar atau *bed material transport*, dimana asal materialnya dari saluran sendiri. Angkutan sedimen inidapat berupa bed load dan suspended load
2. Muatan hanyutan atau *wash load transport*, yang materialnya datang dari sumber-sumber luar saluran merupakan akibat dari erosi di hulu. Pada umumnya angkutan wash load merupakan suspended load

Mekanisme angkutan sedimen dapat berupa partikelnya bergeser melayang dalam air yang terbawa aliran disebut *suspended load* atau muatan melayang, sedangkan bila sedimen dimana gerakan partikelnya menggelinding, bergeser dan berlompatan disebut *bed load* atau muatan dasar.



Gambar 2. 6 Skema angkutan sedimen
(Sumber: Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. 2009)

Volume tampungan waduk dapat berkurang akibat terjadi sedimentasi di daerah genangan waduk. Sedimentasi merupakan proses alami dari penumpukan sedimen yang terbawa ke dalam waduk dan mempengaruhi umur layanan waduk. Aliran sungai dan arus yang masuk ke dalam waduk berkurang kecepatannya, sehingga menyebabkan kapasitas angkutan sedimen di bagian *inlet* waduk berkurang yang menyebabkan penumpukan sedimen di bagian *inlet* waduk atau di bagian pertemuan antara genangan dengan sungai. Proses sedimentasi di daerah genangan waduk diawali dengan butiran sedimen yang lebih besar terlebih dahulu kemudian bagian butiran sedimen yang lebih halus akan mengendap kemudian dengan posisi lebih jauh dari *inlet*. Hasil dari proses sedimentasi ini ditunjukkan oleh Gambar 2.7 Profil Tipikal Pengendapan Sedimen (Strand dan Pamberton, 1982). Tujuan utama dari analisa sedimentasi pada waduk adalah untuk mengetahui luas dan kapasitas waduk, sehingga diketahui pola penyebaran sedimen dan umur layanan waduk.



Gambar 2. 7 Profil Tipikal Pengendapan Sedimen
(Sumber: Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. 2009)

2.3.1. Laju Sedimentasi Muatan Melayang (*Suspended Load*)

Laju muatan sedimen melayang dihitung berdasarkan data pengukuran sedimen melayang. Persamaan untuk memperkirakan laju muatan sedimen melayang:

$$QS = 0,0864 \cdot C \cdot QW \quad (2.21)$$

dengan:

QS = muatan sedimen melayang (ton/hari)

C = konsentrasi (mg/l)

QW = debit sungai (m³/dt)

- Persamaan Einstein

$$q_s = 11,6 \cdot u_* \cdot C_a \left(I_1 \cdot \ln \left(\frac{h}{0,333 k_s} \right) + I_2 \right) \quad (2.22)$$

dimana

I_1, I_2 = integral Einstein

u_* = kecepatan aliran rata-rata

C_a = konsentrasi sedimen referensi

h = kedalaman air

- Persamaan Bijker

$$q_s = 1,83 \cdot q_B \cdot \left(I_1 \cdot \ln \left(\frac{h}{0,333 k_s} \right) + I_2 \right) \quad (2.23)$$

Dimana q_B didapat dari rumus Kalinske-Frinjlink

$$q_B = 2d_{50} \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}} \exp \left(\frac{-0,27(s-1)d_{50}\rho g}{\tau_b} \right) \quad (2.24)$$

- Rumus Lane dan Kalinskie

$$q_s = q \cdot C_a \cdot P_L \cdot \exp \left(\frac{15 \cdot \omega \cdot a}{u_* \cdot h} \right) \quad (2.25)$$

Dimana P_L = perbandingan integral kedalaman konsentrasi sedimen rata-rata terhadap konsentrasi sedimen kedalaman a

ω = kecepatan jatuh d_{50}

u_* = kecepatan aliran rata-rata

C_a = konsentrasi sedimen kedalaman a

- Persamaan Brook

$$q_s = C_{md} \cdot q \cdot \left[1 + \frac{u_*}{kV} \cdot \int_E^1 \left(\frac{1-z}{z} \right)^{z1} \cdot z \cdot dz + 1 + \frac{u_*}{kV} \cdot \int_E^1 \left(\frac{1-z}{z} \right)^{z1} \cdot \ln \cdot z \cdot dz \right] \quad (2.26)$$

Dimana q = debit air persatuan lebar dan

C_{md} = referensi konsentrasi sedimen pada $z=1/2$ h

- Persamaan Chang, Simons dan Richardson

$$q_s = h \cdot Ca \cdot \left((V \cdot I_1 -) \left(\frac{2 \cdot u_*}{k} \right) + I_2 \right) \quad (2.27)$$

2.3.2. Laju Sedimentasi Muatan Dasar (*Bed Load*)

- Persamaan Duboy

$$qb = \frac{0,173}{d^{3/4}} \tau (\tau - \tau_c) \quad (2.28)$$

Dimana τ = tegangan geser

τ_c = tegangan geser kritis

- Persamaan Kalinske-Frijlink

$$q_B = 2d_{50} \sqrt{\frac{\tau b}{\rho}} \exp \left(\frac{-0,27(s-1)d_{50}\rho g}{\tau' b} \right) \quad (2.29)$$

Dimana τb = tegangan geser dasar

$\tau' b$ = tegangan geser dasar efektif

- Persamaan Meyer Peter dan Muller (MPM)

$$\phi_b = 13,3 \cdot (Y^{-1} - 0,047)^{3/2} \quad (2.30)$$

$$Y = \frac{\Delta \cdot d}{\mu \cdot h \cdot I} \quad (2.31)$$

$$\mu = \left(\frac{C}{C'} \right)^{3/2} \quad (2.32)$$

$$C = 18 \log \left(\frac{12h}{d_{50}} \right) \quad C' = 18 \log \left(\frac{12h}{d_{90}} \right) \quad (2.33)$$

$$\phi_b = \frac{q_B}{d \sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d}} \quad (2.34)$$

dengan : ϕ_b = Laju muatan sedimen dasar (kg/det)

- q_b = debit muatan sedimen dasar (Kg/det/m)
 s = $\gamma_s - \gamma_w$ = selisih kerapatan sedimen dengan air
 g = percepatan gravitasi bumi (9,81 m/det²)
 d = ukuran median diameter butir (m)

- Persamaan Einstein

$$\phi_b = 100 \cdot Y^{-3} \quad (2.35)$$

$$\mu = \left[\sqrt{\left(2/3 + \frac{36v^2}{\Delta g d^3}\right)} - \sqrt{\left(\frac{36v^2}{\Delta g d^3}\right)} \right]^3 \quad (2.36)$$

- Persamaan Van Rijn

$$q_b = 0,053[(s - 1)g]^{0,5} \cdot d_{50}^{1,5} \cdot D_*^{0,3} \cdot T^{2,1} \quad (2.37)$$

dengan : q_b = debit muatan sedimen dasar

D_* = parameter butiran

- Persamaan Schocklitsch

$$q_b = 2500 \cdot I_b^{\frac{3}{2}} \cdot (q - q_c) \quad (2.38)$$

dimana : q_c = debit kritis permulaan gerak

$$\text{dengan } q_c = \frac{0,6 \cdot d^{3/2}}{I_b^{7/6}} \quad (2.39)$$

- Persamaan Bagnold

$$q_b = \frac{e_b \cdot \tau_b \cdot \bar{u}}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \cos \beta (\tan \phi - \tan \beta)} \quad (2.40)$$

Dimana:

τ_b = Tegangan geser dasar total (N/m²)

\bar{u} = kecepatan aliran rata-rata (m/dt)

e_b = faktor efisiensi (0,1 - 0,2)

$\tan \phi$ = 0,6 = koefisien friksi dinamis (-)

$\tan \beta$ = I_b = kemiringan dasar saluran (-)

2.3.3. Laju Sedimentasi Muatan Total (*Total Load*)

Berdasarkan metode angkutan sedimen, angkutan sedimen total adalah jumlah angkutan sedimen dasar dan angkutan

sedimen suspensi. Ada dua pendekatan dalam menentukan angkutan sedimen total. Pertama, menghitung angkutan sedimen dasar dan angkutan sedimen suspensi secara terpisah, kemudian menjumlahkannya. Kedua, menentukan fungsi angkutan sedimen total secara langsung tanpa dibagi dalam angkutan sedimen dasar dan angkutan sedimen suspensi. Untuk menentukan kapasitas angkutan sedimen pada sungai alami, dengan pengecualian untuk material kasar, dimana sebagian besar diangkut sebagai angkutan dasar sedimen, persamaan angkutan total harus digunakan.

- Persamaan Bijker's

$$q_t = q_B \left(1 + 1,83 \cdot \left(I_1 \cdot \ln \left(\frac{h}{0,333 k_s} \right) + I_2 \right) \right) \quad (2.41)$$

- Persamaan Bagnold

$$q_t = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \tau V \left(\frac{e_b}{\tan \alpha} + 0,01 \frac{V}{\omega} \right) \quad (2.42)$$

- Persamaan Engelund-Hansen

$$q_t = 0.05 \gamma_s V^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \left[\frac{\tau_b}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right]^{3/2} \quad (2.43)$$

- Persamaan Ackers White

$$F_{gr} = U_* \left[g d \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \right]^{-1/2} \cdot \left[\frac{V}{\sqrt{32} \log(\alpha \cdot h/d)} \right]^{1-n} \quad (2.44)$$

Dimana F_{gr} =angka mobilitas sedimen

α = koefisien dalam persamaan rough turbulen

n = eksponen trasisi

- Persamaan Chang, Simons, Richardson

$$q_t = q_{bw} + q_{sw} = K_t \cdot V (\tau_0 - \tau_c) (1 + R_s) \quad (2.45)$$

- Persamaan Laursen

$$q_t = q \cdot C_t \quad (2.46)$$

$$C_t = 0.01 \gamma \sum_i p_i \left(\frac{d_i}{D} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{ci}} - 1 \right) f \left(\frac{U_*}{\omega_i} \right) \quad (2.47)$$

Dimana q = debit aliran persatuan lebar

q_t =debit sedimen persatuan lebar

γ = berat jenis air

d_i = ukuran partikel sedimen berpresentase $i\%$

D = kedalaman rata-rata

τ' = tegangan geser

τ_{ci} = tegangan geser kritis

U_* = kecepatan geser

ω_i = kecepatan jatuh partikel sedimen ukuran i

2.3.4. Sedimentasi dengan *Software* HEC-RAS

Software HEC-RAS mampu mensimulasikan transpor sedimen satu dimensi (simulasi perubahan dasar sungai) akibat erosi atau deposisi dalam waktu tertentu yang umumnya adalah tahunan. Transpor sedimen pada HEC-RAS mampu memprediksi kapasitas angkutan untuk sedimen non-kohefif pada parameter hidrolis eksisting. Hasil dari simulasi ini dapat berupa laju sedimentasi dan plot dari profilnya. Sebelum HEC-RAS dapat mensimulasikan transpor sedimen, hidrolis sungai harus didefinisikan lebih dulu. *Software* HEC-RAS menggunakan penyederhanaan hidrodinamik, pendekatan umum banyak digunakan dalam pemodelan transpor sedimen.

a. Kontinuitas Sedimen

Penelusuran sedimen pada program HEC-RAS dengan persamaan kontinuitas sedimen yaitu persamaan Exner adalah sebagai berikut:

$$(1 - \lambda_p)B \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial Q_s}{\partial x} \quad (2.48)$$

dimana

B = lebar saluran

η = elevasi saluran

λ_p = porositas lapisan

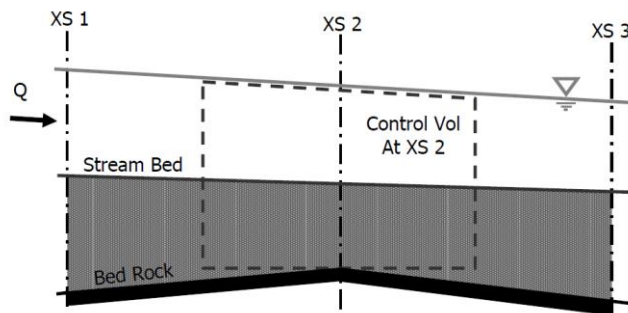
t = waktu

x = jarak

Q_s = muatan angkutan sedimen

Persamaan ini menyatakan bahwa perubahan volume sedimen dalam volume kontrol adalah sama dengan perbedaan antara muatan *inflow* dan muatan *outflow* sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.7 Skema Kontrol Volume Sedimen dengan *Software* HEC-RAS. Persamaan kontinuitas sedimen

diselesaikan dengan menghitung kapasitas angkutan sedimen melalui volume kontrol pada setiap penampang *cross section* tertentu. Kapasitas muatan sedimen keluar volume kontrol dibandingkan dengan pasokan sedimen memasuki volume kontrol. Jika kapasitas sedimen keluar lebih besar dibandingkan muatan sedimen yang masuk maka terjadi erosi, jika kapasitas sedimen keluar lebih besar dari pasokan maka ada surplus sedimen yang menyebabkan terjadinya sedimentasi.



Gambar 2. 8 Skema Kontrol Volume Sedimen dengan *Software* HEC-RAS

(Sumber: *US Army Corps of Engineers*. 2016)

b. Daya Angkutan Sedimen

Daya angkutan sedimen adalah berapa banyak material dari ukuran sedimen tertentu yang dapat diangkut oleh air. Daya angkut sedimen dihitung dengan salah satu dari beberapa rumus *sediment transport* yang terdapat pada program HEC-RAS. Sebagian besar persamaan sedimen transport ini dihitung dengan ukuran butir tunggal seperti d_{50} atau d_{90} saja. Ada tujuh persamaan daya angkut sedimen pada *software* HEC-RAS

1. Acker dan White

Persamaan ini merupakan fungsi *total load* yang dikembangkan berdasarkan asumsi bahwa angkutan sedimen halus berhubungan dengan fluktuasi turbulen air dan angkutan sedimen kasar berhubungan erat

dengan gaya geser atau dalam variable disebut dengan kecepatan rata-rata. Sedimen halus yang dimaksud adalah lanau berukuran kurang dari 0,04 mm dan sedimen kasar berukuran lebih dari 2,5 mm.

$$X = \frac{G_{gr} s d_s}{D \cdot \left(\frac{u_*}{V}\right)^n} \quad \text{and} \quad G_{gr} = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right) \quad (2.49)$$

dimana

X = konsentrasi sedimen per segmen

G_{gr} = parameter transpor sedimen

s = *specific gravity* sedimen

d_s = nilai tengah diameter partikel

D = kedalaman efektif

u_* = kecepatan geser

V = kecepatan saluran rata-rata

n = *transition exponen*, tergantung ukuran sedimen

C = koefisien

F_{gr} = parameter mobilitas sedimen

A = parameter mobilitas sedimen kritis

2. England Hansen

Rumus ini merupakan fungsi prediksi total load yang hasilnya cukup untuk sungai berpasir dengan substansi angkutan melayang. Percobaan dari persamaan ini berasal dari data *flume* dengan ukuran sedimen 0,19 mm sampai 0,93 mm.

$$g_s = 0.05 \gamma_s V^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right)}} \left[\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right]^{3/2} \quad (2.50)$$

dimana

g_s = *unit sediment transport*

γ = berat jenis air

γ_s = berat jenis sedimen

V = kecepatan rata-rata saluran

τ_0 = tegangan geser dasar

d_{50} = ukuran partikel 50%

3. Laursen-Copeland

Fungsi prediksi angkutan sedimen total ini diturunkan dari kombinasi analisis kualitatif, eksperimen langsung, dan data pendukung. Rentang ukuran nilai tengah sedimen yang diaplikasikan antara 0,11 sampai 29 mm.

$$C_m = 0.01\gamma \left(\frac{d_s}{D}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau_0}{\tau_c} - 1\right) f\left(\frac{u_*}{\omega}\right) \quad (2.51)$$

C_m = konsentrasi aliran sedimen

γ = berat jenis air

d_s = nilai tengah diameter partikel

D = kedalaman efektif

τ_0 = tegangan geser dasar

τ_c = tegangan geser dasar kritis

$f\left(\frac{u_*}{\omega}\right)$ = fungsi dari rasio kecepatan geser dan kecepatan jatuh.

4. Meyer-Peter Muller

$$\left(\frac{k_r}{k'_r}\right)^{3/2} \gamma R S 0.047 (\gamma_s - \gamma) d_m + 0.25 \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s}\right)^{2/3} g_s^{2/3} \quad (2.52)$$

g_s = unit sediment transport rate dalam berat/waktu/lebar

k_r = koefisien kekasaran

k'_r = koefisien kekasaran berdasarkan butiran

γ = berat jenis air

γ_s = berat jenis sedimen

g = percepatan gravitasi

d_m = nilai tengah diameter partikel

R = radius hirolis

S = gradien energi

5. Toffaleti
6. Yang
7. Wilcock

Pemilihan rumus angkutan sedimen perlu dipertimbangkan berdasarkan data yang dibutuhkan dalam persamaan tersebut. Berikut pada Tabel 2.5 ditunjukkan kebutuhan data yang diperlukan dari masing-masing persamaan.

Dimana d = semua diameter partikel
 d_m = nilai tengah diameter partikel
 s = spesifik gravity sedimen
 V = kecepatan rata-rata penampang
 D = kedalaman penampang
 S = kemiringan garis energi
 W = lebar saluran
 T = suhu air
 R = jari-jari hidrolis
 NA = data tidak dibutuhkan

Tabel 2. 5 *Range input* data untuk persamaan angkutan sedimen

Function	d	d_m	s	V	D	S	W	T
Ackers-White (<i>flume</i>)	0.04 - 7.0	NA	1.0 - 2.7	0.07 - 7.1	0.01 - 1.4	0.00006 - 0.037	0.23 - 4.0	46 - 89
Englund-Hansen (<i>flume</i>)	NA	0.19 - 0.93	NA	0.65 - 6.34	0.19 - 1.33	0.000055 - 0.019	NA	45 - 93
Laursen (<i>field</i>)	NA	0.08 - 0.7	NA	0.068 - 7.8	0.67 - 54	0.0000021 - 0.0018	63 - 3640	32 - 93
Laursen (<i>flume</i>)	NA	0.011 - 29	NA	0.7 - 9.4	0.03 - 3.6	0.00025 - 0.025	0.25 - 6.6	46 - 83
Meyer-Peter Muller (<i>flume</i>)	0.4 - 29	NA	1.25 - 4.0	1.2 - 9.4	0.03 - 3.9	0.0004 - 0.02	0.5 - 6.6	NA
Tofaletti (<i>field</i>)	0.062 - 4.0	0.095 - 0.76	NA	0.7 - 7.8	0.07 - 56.7 (R)	0.000002 - 0.0011	63 - 3640	32 - 93
Tofaletti (<i>flume</i>)	0.062 - 4.0	0.45 - 0.91	NA	0.7 - 6.3	0.07 - 1.1 (R)	0.00014 - 0.019	0.8 - 8	40 - 93
Yang (<i>field-sand</i>)	0.15 - 1.7	NA	NA	0.8 - 6.4	0.04 - 50	0.000043 - 0.028	0.44 - 1750	32 - 94
Yang (<i>field-gravel</i>)	2.5 - 7.0	NA	NA	1.4 - 5.1	0.08 - 0.72	0.0012 - 0.029	0.44 - 1750	32 - 94

(Sumber: US Army Corps of Engineers. 2016)

c. Kecepatan Jatuh

Kecepatan jatuh berpengaruh besar dalam proses angkutan sedimen. Suatu sedimen akan tetap melayang atau tidak mengendap selama kecepatan aliran arah vertikal lebih besar dari kecepatan jatuh. Pada *software* HEC-RAS terdapat tiga metode perhitungan kecepatan jatuh yaitu Toffaleti (1968), Van Rijn (1993), dan Rubey (1933).

Faktor bentuk penting untuk partikel bergolongan ukuran medium sands atau lebih besar. Toffaleti menggunakan besar nilai sf 0,9. Perbedaan kecepatan jatuh dipengaruhi oleh suhu dan ukuran partikel. Sedangkan Van Rijn nilai sf -nya 0,7 yang sama dengan perkiraan untuk besar pasir alami. Persamaan kecepatan jatuh menurut Van Rijn adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} &\text{Untuk } 0,001 < d \leq 0,1 \text{ mm} \\ \omega &= \frac{(s-1)gd}{18\nu} \end{aligned} \quad (2.53)$$

$$\begin{aligned} &\text{Untuk } 0,1 < d \leq 1 \text{ mm} \\ \omega &= \frac{10\nu}{d} \left[\left(1 + \frac{0,01(s-1)gd^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} &\text{Untuk } d > 1 \text{ mm} \\ \omega &= 1,1[(s-1)gd]^{0.5} \end{aligned} \quad (2.55)$$

Dimana ω = kecepatan jatuh partikel
 ν = viskositas kinematis
 s = *specific gravity* partikel
 d = diameter partikel

Persamaan Rubey dapat digunakan untuk jenis partikel sedimen dari lanau, pasir, dan kerikil. *Specific gravity* yang terbaik untuk diaplikasikan adalah 2,65. Persamaan Rubey adalah sebagai berikut

$$\omega = F_{1.}[(s - 1)gd]^{0.5} \quad (2.56)$$

Dengannilai F1

$$F_{1.} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd^3(s-1)}} - \sqrt{\frac{36v^2}{gd^3(s-1)}} \quad (2.57)$$

d. Gradasi Sedimen

Gradasi partikel sedimen berpengaruh besar dalam terjadinya angkutan sedimen. Kapasitas angkutan sedimen untuk semua ukuran merupakan penjumlahan dari kapasitas angkutan sedimen total.

$$g_s = \sum_{i=1}^n g_{si}p_i \quad (2.58)$$

dimana

- g_s = angkutansedimen total
- n = jumlah kelas ukuran sedimen
- g_{si} = angkutan sedimen ukuran i
- p_i = fraksi kelas ukuran i

Kelas ukuran sedimen berdasarkan American Geophysical Union yang digunakan sebagai pada *software* HEC-RAS ditunjukkan oleh Tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Klasifikasi Ukuran Partikel

Sediment Material	Grain Diameter Range(mm)	Geometric Median Diameter (mm)
Clay	0.002-0.004	0.003
Very Fine Silt	0.004-0.008	0.006
Fine Silt	0.008-0.016	0.011
Medium Silt	0.016-0.032	0.023
Coarse Silt	0.032-0.0625	0.045
Very Fine Sand	0.0625-0.125	0.088
Fine Sand	0.125-0.250	0.177
Medium Sand	0.250-0.5	0.354
Coarse Sand	0.5-1.0	0.707
Very Coarse Sand	1-2	1.41
Very Fine Gravel	2-4	2.83
Fine Gravel	4-8	5.66
Medium Gravel	8-16	11.3
Coarse Gravel	16-32	22.6
Very Coarse Gravel	32-64	45.3
Small Cobbles	64-128	90.5
Large Cobbles	128-256	181
Small Boulders	256-512	362
Medium Boulders	512-1024	724
Large Boulders	1024-2048	1448

(Sumber: US Army Corps of Engineers. 2016)

e. Kapasitas Angkutan Sedimen

Kapasitas angkutan sedimen untuk tiap kelas ukuran sedimen dihitung sebagai berikut:

$$T_c = \sum_{i=1}^n B_j I_i \quad (2.58)$$

dimana

T_c = kapasitas total angkutan

n = jumlah kelas ukuran sedimen

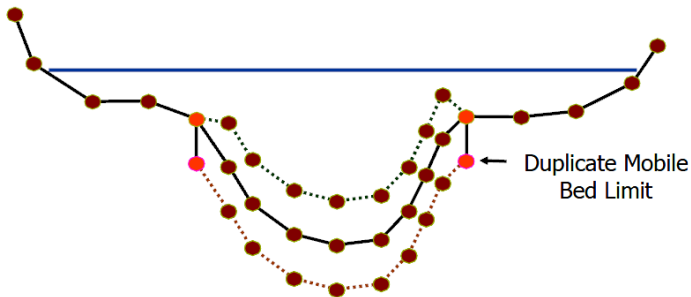
β_j = persentase lapisan pada kelas sedimen “j”

T_j = potensial angkutan untuk kelas material “j”

f. Perubahan Dasar Saluran

Surplus maupun defisit sedimen pada *cross section* tertentu akan menimbulkan perubahan pada dasar saluran baik berupa

erosi maupun sedimentasi. Pada gambar 2.9 ditunjukkan contoh perubahan dasar sungai akibat erosi dan sedimentasi.



Gambar 2. 9 Perubahan dasar saluran standar (contoh)
(Sumber: US Army Corps of Engineers. 2010)

2.4 Software HEC-RAS

Menurut Istiarto (2014), HEC-RAS merupakan aplikasi untuk memodelkan aliran di sungai, *River Analysis System* (RAS), *software* ini dibuat oleh *Hydrologic Engineering Center* (HEC) yang merupakan satu divisi di dalam *Institut for Water Resources* (IWR). HEC-RAS merupakan *software* satu dimensi aliran permanen maupun tak permanen (*steady and unsteady one-dimensional flow model*), HEC-RAS memiliki empat komponen analisa hidrolika satu dimensi untuk :

- 1) hitungan profil muka air aliran permanen,
- 2) simulasi aliran tak permanen,
- 3) hitung transpor sedimen,
- 4) hitungan kualitas air.

Satu elemen penting dalam HEC-RAS adalah keempat komponen tersebut menggunakan data geometri yang sama, hitungan hidraulika yang sama.

HEC-RAS merupakan program aplikasi yang mengintegrasikan fitur *graphical user interface*, analisis hidraulik, manajemen dan penyimpanan data, grafik, serta pelaporan, Istiarto (2014).

1. *Graphical User Interface*

Interface berfungsi sebagai penghubung antara pemakai dan HEC-RAS. *Graphical interface* dibuat untuk memudahkan pemakai HEC-RAS dengan tetap mempertahankan efisiensi. Melalui *graphical interface* ini, dimungkinkan untuk melakukan hal-hal berikut ini dengan mudah:

- a. Manajemen file,
- b. Input dan edit data,
- c. Melakukan analisis hidraulik,
- d. Menampilkan data masukan dan hasil analisis dalam bentuk tabel dan grafik,
- e. Penyusunan laporan,
- f. Mengakses *on-line help*.

2. Analisa Hidraulik

Berdasarkan karakter sungai, maka analisa akan dilakukan untuk menghitung profil muka air aliran permanen berubah lambat laun, program mampu memodelkan jaringan sungai. Aliran yang dapat dimodelkan adalah aliran sub-kritis, super-kritis, maupun gabungan dari kedua aliran tersebut. Selain itu, *software* ini mampu menyimulasikan aliran tak permanen satu dimensi pada sungai yang memiliki alur kompleks.

3. Manajemen dan Penyimpanan Data

Data masukan dari pengguna HEC-RAS disimpan ke dalam file dan dikelompokkan menjadi : *plan*, *geometry*, *steady flow*, *unsteady flow*, *project* dan *sediment* data. Hasil dari program akan disimpan ke dalam *binary file*.

4. Grafik dan Pelaporan

Software ini menyediakan pola fitur plot 3D beberapa tampang lintang sekaligus. Hasil dari program dapat ditampilkan dalam bentuk tabel. Grafik dan tabel tersebut dapat ditampilkan di layar, dicetak, atau disalin ke *clipboard* untuk dimasukkan ke dalam program aplikasi lain. Fasilitas ini dapat berupa pencetakan data masukan dan keluaran hasil pada *printer* atau *plotter*.

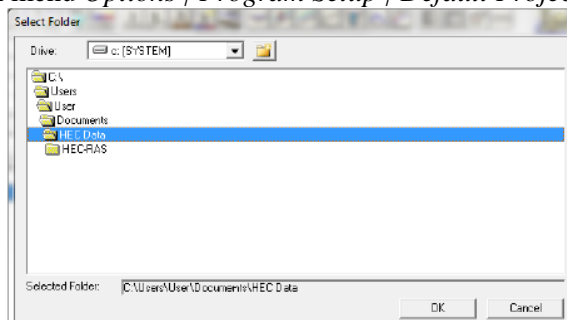
Terdapat lima langkah penting dalam membuat model hidrolika dengan HEC-RAS yaitu:

- 1) Pembuatan *project*,
- 2) Memasukkan data geometri sungai,
- 3) Memasukkan hidraulika sungai,
- 4) Melakukan perhitungan hidraulika aliran,
- 5) Menampilkan dan mencetak hasil hitungan.

1. Pembuatan project

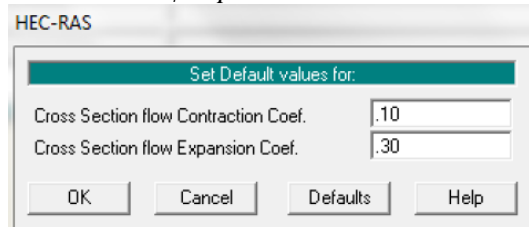
Langkah pertama pembuatan model sungai adalah pembuatan *project* baru. Terlebih dahulu untuk melakukan pengaturan awal HEC-RAS agar memudahkan penggunaannya. Pengaturan di sini dimaksudkan untuk menetapkan nilai atau definisi bawaan HEC-RAS (nilai *default*). Pengaturan ini tidak mutlak harus dilakukan, namun apabila dilakukan akan memudahkan pemakai dalam melakukan pemodelan dengan HEC-RAS. Menu *Options* menyediakan fasilitas untuk melakukan pengaturan ini. Pengaturan yang sebaiknya dilakukan antara lain *Program Setup* / *Default Project Folder*, *Default Project Parameters* / *Expansion and Contraction Coef ...*, serta *Unit System* (US Customary/SI) .

- *Default Project Folder*. Opsi ini dipakai untuk mengatur folder *default* yang dipakai untuk menyimpan *file project*. Pilih menu *Options* / *Program Setup* / *Default Project Folder*



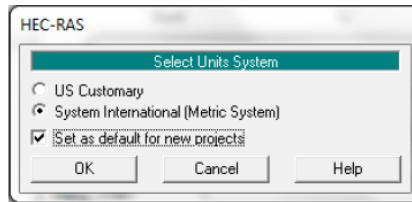
Gambar 2. 10 Layer Penetapan Folder Penyimpanan *File Project*
(Sumber: Istiarto,2014)

- *Expansion and Contraction Coefficients.* Nilai default koefisien pelebaran (ekspansi) dan persempitan (kontraksi) tampang sungai berturut-turut adalah 0.3 dan 0.1. Kedua nilai tersebut umumnya berlaku pada perubahan tampang sungai secara gradual. Jika perubahan tampang sungai pada kasus yang sedang dimodelkan pemakai sebagian besar adalah perubahan mendadak, maka nilai default kedua koefisien tersebut lebih baik diubah, misal koefisien ekspansi menjadi 0.8 dan koefisien kontraksi menjadi 0.3. Untuk mengubah nilai default kedua koefisien ini, klik pada menu *Options / Default Parameters / Expansion and Contraction Coef.*




Gambar 2. 11 Layar Pengaturan Nilai *Default* Koefisien Ekspansi dan Konstraksi
(Sumber: Istiarto, 2014)

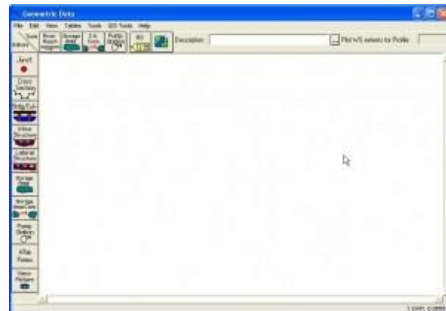
- *Unit System.* Sistem satuan yang dipakai dalam HEC-RAS dapat mengikuti sistem Amerika (*US Customary*) atau sistem internasional (SI). *Default* satuan adalah *US Customary*. Untuk mengubahnya, klik pada menu *Options / Unit System (US Customary/SI) ... | System International (Metric System)*. Agar sistem satuan SI menjadi sistem satuan default setiap kali membuat project baru, klik *Set as default for new projects*, yaitu baris ketiga di bawah *System International (Metric System)* seperti tampak pada Gambar 2.12. Pengubahan sistem satuan yang telah ditetapkan pada suatu project, dari *US Customary* ke SI atau sebaliknya, selalu dapat dilakukan dengan memakai menu *Options / Convert Project Units*.




Gambar 2. 12 Layar Pengaturan Sistem Satuan
(Sumber: Istiarto,2014)


2. Memasukkan data geometri

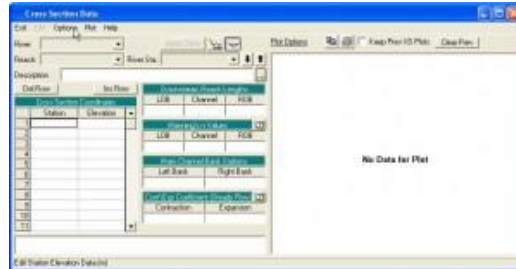
Parameter geometri sungai yang dibutuhkan untuk membangun model adalah alur sungai, tampang panjang dan lintang (*longitudinal section dan cross section*), kekasaran dasar sungai (koefisien *Manning*), serta kehilangan energi di tempat perubahan tampang lintang sungai (koefisien ekspansi dan kontraksi). Pembuatan geometri data adalah dengan cara klik *tool bar* “*Edit/Enter Geometric Data*”  dari tampilan awal HEC-RAS.



Gambar 2. 13 Tampilan Geometri Data
(Sumber: Istiarto,2014)

Setelah tampilan geometri data muncul kemudian membuat *lay out* sungai dengan cara mengklik *tool bar* “*River Reach*” dari tampilan *Geometric Data* , dari tampilan geometri data tersebut nantinya dapat digunakan untuk menggambar *lay out* sungai, serta memberi nama pada *River* dan *Reach* tersebut.

Arah aliran saluran adalah sesuai dengan arah penggambaran. Setelah *lay out* sungai selesai, langkah selanjutnya adalah memasukkan data potongan melintang (*cross section*) sungai dengan cara mengklik ikon “*Cross Section*” pada tampilan *Geometric Data* ().



Gambar 2. 14 Tampilan Setelah Memilih *Icon Cross Section*
(Sumber: Istiarto,2014)

Langkah yang perlu dilakukan setelah itu adalah:

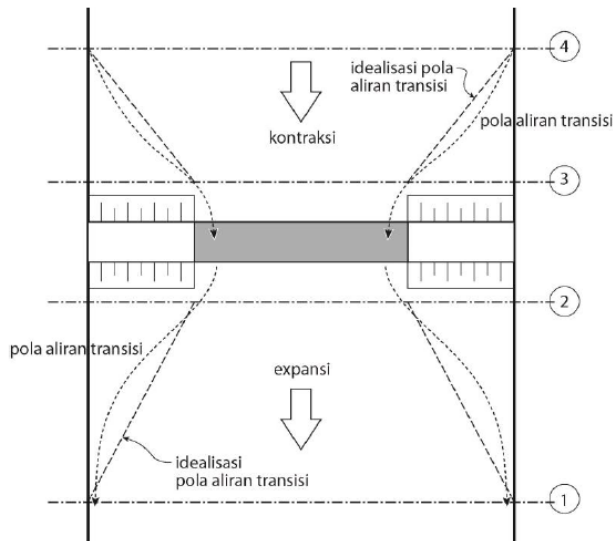
- Memasukkan data-data potongan melintang dengan mengklik *Option / Add a New Cross Section*.
- *River*, *Reach*, dan *River Station* merupakan kotak yang memungkinkan pengguna untuk memilih *River* ataupun *Reach* tertentu yang tersedia dalam diagram skematik. *River* dan *Reach* ini menentukan penampang yang akan berlokasi. *River Station* tidak harus menjadi *station* sungai yang sebenarnya dari penampang, tetapi harus menjadi nilai numerik dari penampang. Semakin besar angka numerik yang diberikan pada *River Station* maka menandakan semakin ke hulu *River Station* tersebut.
- Memasukkan data *station* dan *elevation*. Data ini berupa data koordinat titik-titik tampang lintang, urut dari titik paling kiri ke kanan. *Station* adalah jarak titik diukur dari kiri dan *elevation* adalah elevasi titik tersebut.
- Memasukkan *Downstream Reach Length* atau jarak antar potongan melintang. *Downstream Reach Length* menggambarkan jarak antar penampang saat ini dan penampang

berikutnya bagian hilir. Terdiri dari jarak antar bantaran kiri (*left overbank*, LOB), jarak antar alur utama (*main channel*, Channel), dan jarak antar bantaran kanan (*right overbank*, ROB).

- Memasukkan angka Manning berdasarkan kekasaran material. Pada kondisi minimum, pengguna harus memasukkan data Manning secara spesifik untuk *left overbank*, *main channel* dan *right overbank*.
- *Main Channel Bank Station*, berguna untuk menentukan bagian mana dari penampang yang dianggap sebagai saluran utama atau dianggap sebagai *left overbank area* atau *right overbank area*.
- Memasukkan bangunan yang berada di sungai (bendung). Setelah semua geometri di input, langkah selanjutnya yaitu menyimpan data geometri dengan cara *Save Geometri Data As*.

Bentuk struktur (hidraulik) melintang sungai (*inline structure*) yang dapat dimodelkan dalam HEC-RAS adalah jembatan, gorong-gorong, bendung tetap, dan bendung gerak (bendung berpintu). Keempat struktur hidraulik ini akan ditambahkan satu per satu pada jaringan sungai dan anak-anak sungainya.

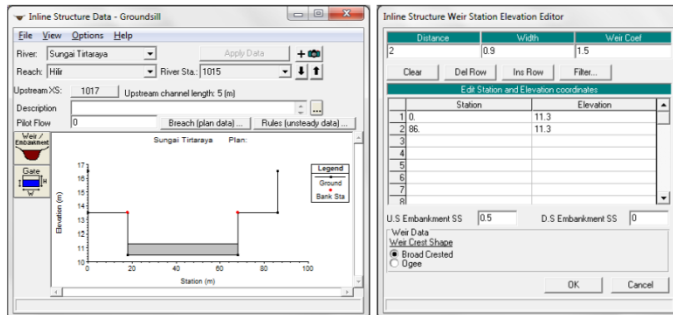
Pemodelan setiap struktur melintang sungai di dalam HEC-RAS memerlukan empat tampang lintang, dua di sisi hulu dan dua di sisi hilir struktur melintang sungai tersebut. Keempat tampang tersebut diperlukan untuk menghitung kehilangan energi di struktur melintang sungai. HEC-RAS secara otomatis akan menambahkan dua tampang lintang di dalam struktur melintang sungai, namun dua tampang lintang internal ini tidak akan tampak oleh pengguna HEC-RAS. Penempatan empat tampang lintang untuk memodelkan sebuah struktur melintang sungai tersebut disajikan pada Gambar 2.16. Untuk keperluan paparan, keempat tampang lintang diberi nomor urut dari hilir, RS 1, 2, 3, dan 4.



Gambar 2. 15 Empat tampang lintang *inline structure* untuk model jembatan
(Sumber: Istiarto, 2014)

Langkah peniruan struktur bendung melintang adalah:

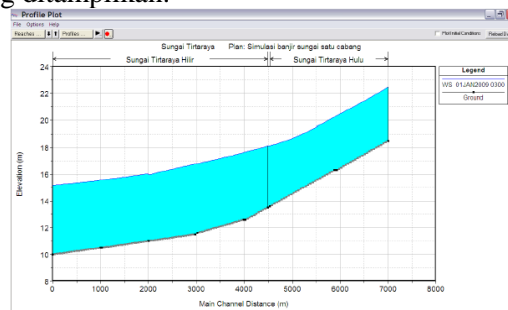
- Aktifkan layar editor data *inline structure* dengan mengklik tombol *Edit and/or create inline structures* (ikon keempat pada papan tombol kiri). Pada layar *editor data inline structure*, aktifkan *River* dan *Reach*.
- Pilih menu *Options / Add an Inline Structure*, tuliskan nomor tampang lintang baru dan klik tombol “OK”. Sebuah tampang lintang baru, RS 1, akan muncul pada layar editor data *inline structure* (Gambar 2.16 sebelah kanan, namun *groundsill* belum tampak).
- Klik tombol *Weir/Embankment* pada papan tombol kiri. Isikan data geometri *groundsill* seperti disajikan pada Gambar 2.16 sebelah kanan. Klik tombol OK. Gambar *groundsill* akan tampak pada layar editor *inline structure* (Gambar 2.16 sebelah kiri).



Gambar 2. 16 Layar editor *inline structure*
(Sumber: Istiarto,2014)

3. Presentasi Hasil Hitungan

HEC-RAS menampilkan hasil hitungan dalam bentuk grafik atau tabel. Presentasi dalam bentuk grafik dipakai untuk menampilkan tampang lintang di suatu *River Reach*, tampang panjang (profil muka air sepanjang alur) (Gambar 2.17), kurva ukur debit, gambar perspektif alur, atau hidrograf. Presentasi dalam bentuk tabel dipakai untuk menampilkan hasil rinci berupa angka (nilai) variabel di lokasi/titik tertentu atau di sepanjang alur. Pada setiap layar tampilan hasil hitungan/simulasi disediakan menu *Options*. Gunakan menu ini untuk mengatur tampilan. Pengguna dapat memilih *plan*, parameter, variabel, ruas sungai yang ditampilkan.



Gambar 2. 17 Profil Muka Air di Sepanjang Sungai
(Sumber: Istiarto,2014)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

Metodologi dalam Tugas Akhir ini disusun untuk memudahkan pengerjaan studi, sehingga memperoleh pemecahan masalah sesuai dengan tujuan. Metode yang digunakan pada Prediksi Laju Sedimentasi pada Tampungan Bendungan Tugu Trenggalek meliputi studi literatur, pengumpulan data, perumusan konsep pengerjaan berupa analisa data dan perhitungan, serta kesimpulan yang didapat dari hasil analisa data dan perhitungan tersebut.

3.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari teori-teori terkait hidrologi, hidrolika bendungan, sedimentasi dan penggunaan *software* HEC-RAS. Literatur yang nantinya akan digunakan sebagai dasar pengerjaan tugas akhir ini dapat berupa buku panduan, makalah, tesis dan sebagainya.

3.2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam tugas akhir ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai Brantas. Data Bendungan Tugu tersebut meliputi:

- a) Data Geometri, berupa data peta kontur wilayah Bendungan Tugu sehingga dapat diketahui *cross section* dari sungai maupun daerah genangan dan alur memanjang sungai.
- b) Data Hidrolika, yaitu penampang melintang maupun memanjang dari sungai dan bangunan pada bendungan, seperti tubuh bendung, saluran pengambilan, dan bangunan pelimpah, yang disesuaikan dengan data geometri.
- c) Data Hidrologi, berupa data debit tersedia sungai.

- d) Data Sedimen, berupa data diameter dan konsentrasi sedimen yang digunakan untuk mengetahui besar sedimentasi pada aliran sungai yang kemudian mempengaruhi tampungan Bendungan Tugu.

3.3. Perumusan Konsep Pengerjaan

Konsep pengerjaan bertujuan untuk menentukan langkah-langkah pengerjaan dalam penyusunan tugas akhir agar dapat dikerjakan secara sistematis. Perhitungan analitik dan pemodelan HEC-RAS ini memerlukan input data antara lain :

- a) Data Geometri
 - Skema alur Sungai Keser
 - Data penampang memanjang dan melintang sungai
- b) Data Hidrolika
 - Bendungan utama
 - Nilai koefisien Manning
 - Bangunan pelimpah
 - Saluran pengambilan
- c) Data Hidrologi
 - Debit sungai tersedia
- d) Data Sedimen
 - Diameter butir sedimen
 - Konsentrasi sedimen

Perhitungan analitik angkutan sedimen dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a) Memilih metode perumusan angkutan sedimen dengan pertimbangan ketersediaan data dan kesesuaian kondisi.
- b) Menghitung sesuai dengan metode yang ditentukan.

Pemodelan dengan menggunakan *software* HEC-RAS ini terdiri dari beberapa langkah utama antara lain:

- a) Memulai proyek baru dengan memberi nama proyek dan menyimpannya pada lokasi yang diinginkan.
- b) Membuat data geometri baru dan menggambar skema alur sungai.
- c) Memasukkan data geometri (skema alur sungai, *cross section*, koefisien hidrolis, struktur bendung, pelimpah dan bangunan pengambilan dll).
- d) Memasukkan data debit sungai dan kondisi aliran yang sesuai.
- e) Memasukkan data sedimen dan metode analisis yang digunakan.
- f) Melakukan *running* program dengan beberapa trial kondisi.
- g) Melihat hasil *running* program

Setelah dilakukan prediksi laju sedimentasi dengan kedua metode tersebut, maka dilakukan perbandingan antara hasil pemodelan dengan *software* HEC-RAS dengan hasil perhitungan analitik angkutan sedimen pada perencanaan Bendungan Tugu. Hal ini dilakukan untuk mengetahui berbagai pertimbangan dalam perencanaan bendungan, terutama dalam hal sedimentasi pada waduk.

3.4. Kesimpulan

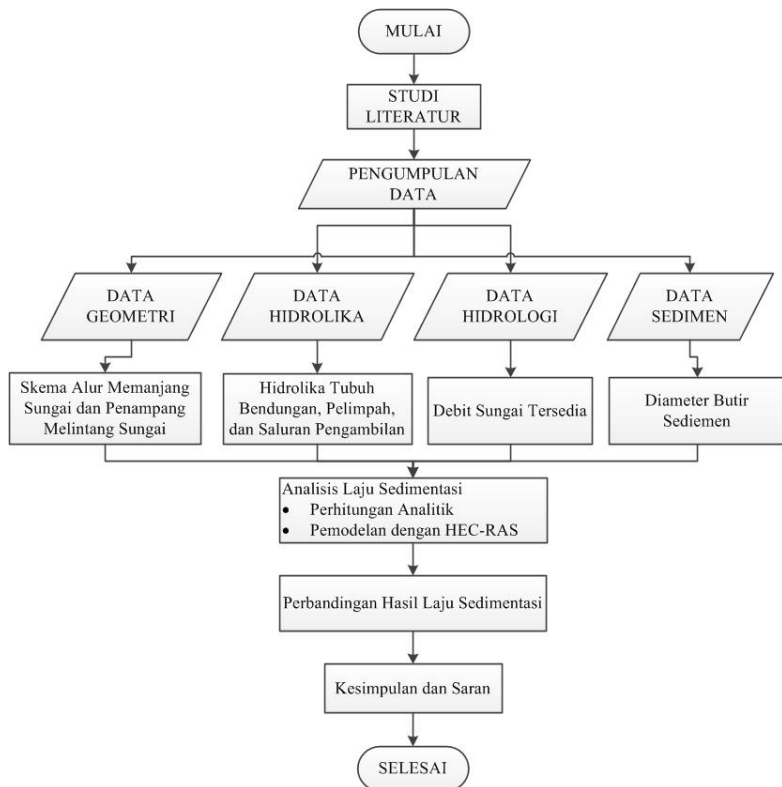
Laporan dengan *output* prediksi laju sedimentasi pada tampungan Bendungan Tugu Trenggalek yang meliputi :

1. Mendapatkan besar laju sedimentasi dari perhitungan analitik.
2. Mendapatkan model sedimentasi yang terjadi pada tampungan waduk

3. Membandingkan besar laju sedimentasi yang terjadi pada bendungan berdasarkan perhitungan analitik dan pemodelan HEC-RAS.

3.5. Diagram Alir

Diagram alir pengerjaan Tugas Akhir ini ditampilkan pada Gambar 3.1.

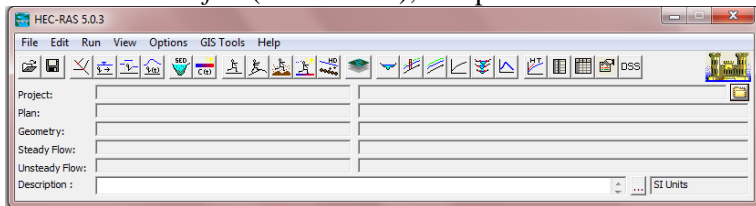


Gambar 3. 1 Diagram Alir Prediksi Laju Sedimentasi pada Tampang Bendungan Tugu Trenggalek

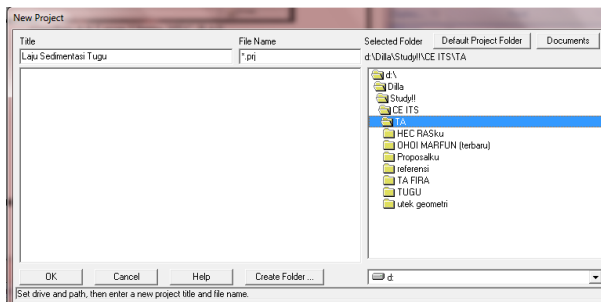
BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan HEC-RAS

Software HEC-RAS dapat digunakan untuk memodelkan analisis *transport* sedimen, baik yang berupa erosi maupun *sedimentasi*. Layar utama saat pertama mengaktifkan program ini adalah seperti pada gambar 4.1. Untuk melakukan pemodelan itu maka diperlukan pengisian tiga data dalam *software* ini antara lain *geometric data*, *quasi-unsteady flow data* dan *sediment boundary condition*. Sebelum melakukan pemodelan terlebih dahulu melakukan penyimpanan *file* dengan memilih menu *File/New Project*, lalu memilih lokasi penyimpanan dan menuliskan nama *file*.(Gambar 4.2), lalu pilih OK.



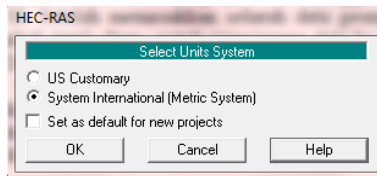
Gambar 4. 1 Layar Utama *Software* HEC-RAS



Gambar 4. 2 Penyimpanan *File Project* HEC-RAS

Kemudian perlu dilakukan pengaturan sistem satuan pada HEC-RAS sehingga pemodelan bisa sesuai. Sistem satuan yang

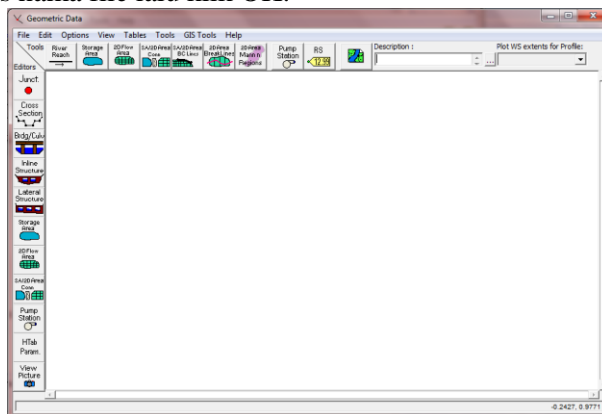
digunakan pada tugas akhir ini adalah *System International*. Pengaturan dilakukan dengan memilih menu *Options/Unit System* (*US Customary/SI*) kemudian pilih *System International (Metric System)* (Gambar 4.3), lalu klik OK. Pada layar utama HEC-RAS sebelah kanan bawah juga akan muncul sistem satuan yang digunakan.



Gambar 4. 3 Pemilihan Sistem Satuan HEC-RAS

4.1.1. Data Geometri


Data geometri dalam pemodelan HEC-RAS digunakan untuk memodelkan penampang sungai yang ditinjau, dengan cara memilih menu *Edit/Enter Geometric Data* (✎). Untuk membuat file geometri pilih menu *File/New Geometry Data* pada layar utama (Gambar 4.4), kemudian lakukan penyimpanan dengan menulis nama file lalu klik OK.

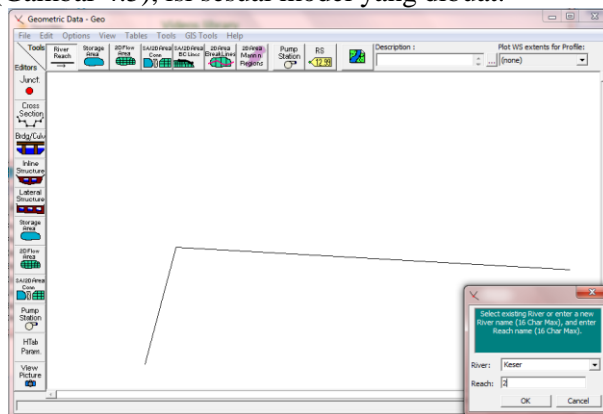


Gambar 4. 4 Layar Utama *Geometric Data*

Langkah pertama adalah membuat alur sungai yang dimodelkan, kemudian mengisi data geometri lain yang dibutuhkan. Data geometri yang dimasukkan meliputi *cross section* (potongan melintang sungai) dan *inline structure* (struktur melintang sungai) yang dalam tugas akhir ini adalah bendungan.

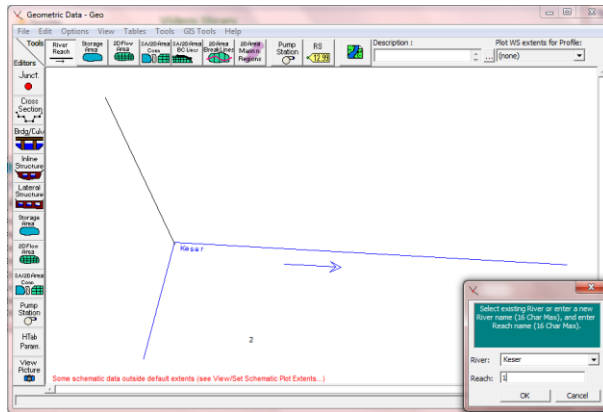
4.1.1.1. Pembuatan Alur Sungai

Pembuatan geometri sungai dimulai dengan memilih menu *River Reach* (). Kemudian membuat skema sungai dengan meng-klik-kan titik-titik sepanjang alur sungai pada layar editor, dan alur harus digambar dari hulu ke hilir. Untuk mengakhiri pembuatan skema suatu alur klik dua kali pada ujung hilir alur tersebut, lalu pada layar akan muncul kotak penamaan *River* dan *Reach* (Gambar 4.5), isi sesuai model yang dibuat.

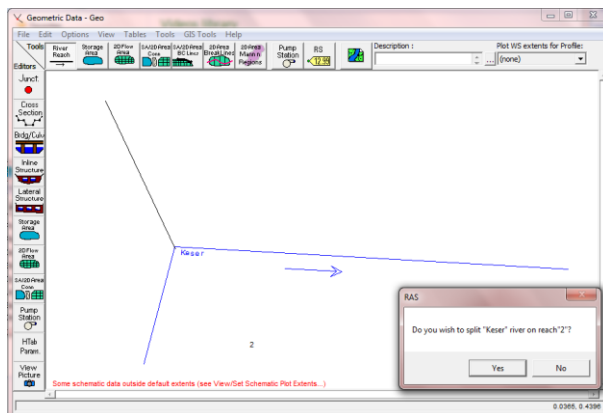


Gambar 4. 5 Pembuatan dan Penamaan Alur Sungai

Pembuatan alur sungai lain yang merupakan percabangan sungai dilakukan dengan cara yang sama (Gambar 4.6) Kemudian akan muncul kotak konfirmasi untuk memotong kedua ruas sungai tersebut, klik *Yes* (Gambar 4.7).



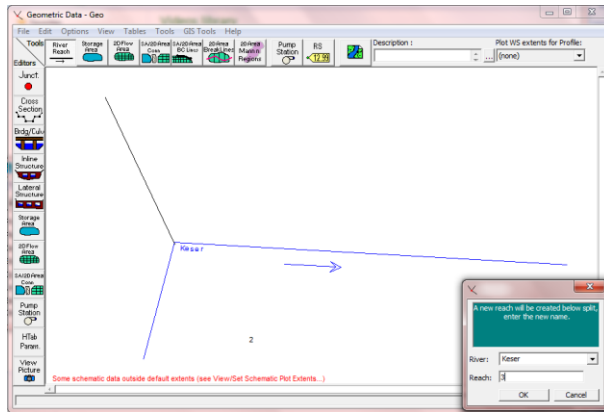
Gambar 4. 6 Pembuatan dan Penamaan Cabang Alur Sungai



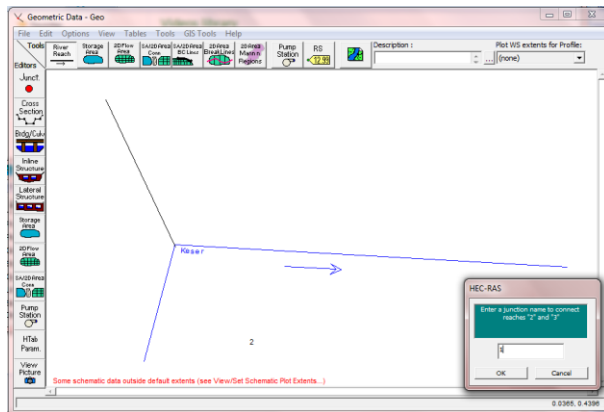
Gambar 4. 7 Konfirmasi Pembuatan Cabang Alur Sungai

Kotak isian penamaan sungai (*River*) dan ruas sungai (*Reach*) bagian hilir dari titik perpotongan, isi sesuai model (Gambar 4.8). Setelah itu akan muncul kotak penamaan titik cabang (*Junction*), mengisinya dengan nama *junction* missal "1" (Gambar 4.9). Maka semua alur Sungai Keser sudah dimodelkan (Gambar 4.10). Penyimpanan geometri data dilakukan pada kotak

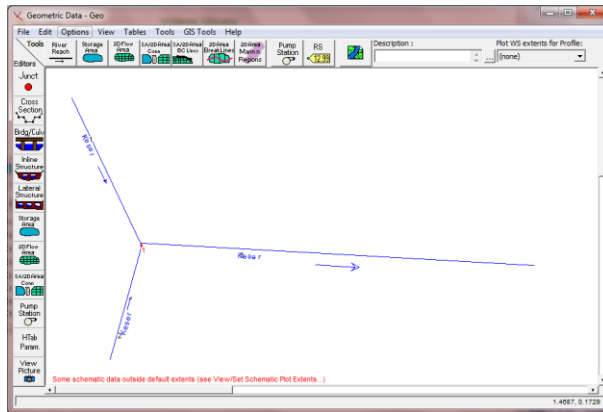
geometric data dengan cara memilih menu *File/Save Geometry Data*.



Gambar 4. 8 Penamaan Alur Sungai Bagian Hilir



Gambar 4. 9 Penamaan Titik Cabang

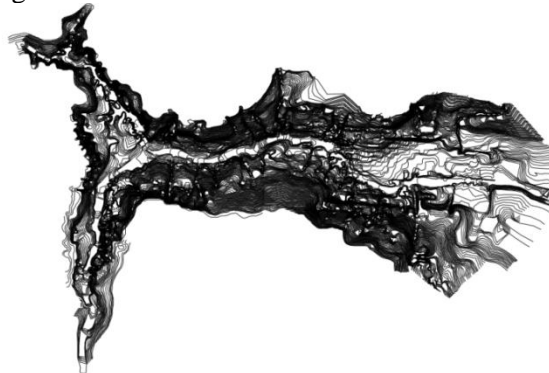


Gambar 4. 10 Hasil Pembuatan Alur Sungai Keser

4.1.1.2. Penampang Melintang Sungai

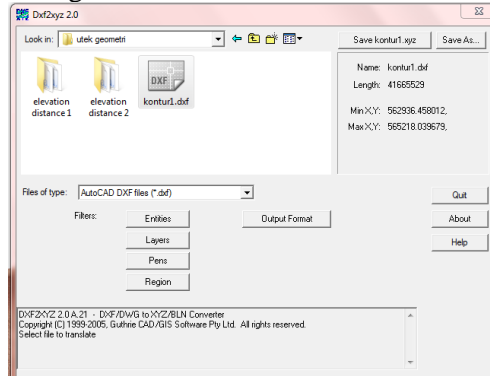
➤ *Cross section Coordinates*

Penampang melintang sungai adalah potongan tegak lurus terhadap aliran sungai. Pada tugas akhir ini, data melintang sungai berasal dari data kontur yang bersumber dari konsultan perencanaan Bendungan Tugu dalam bentuk Autocad (Gambar 4.11) Gambar kontur autocad ini awalnya berformat DWG, kemudian disimpan ulang sebagai file DXF.



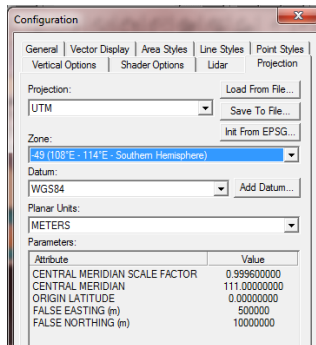
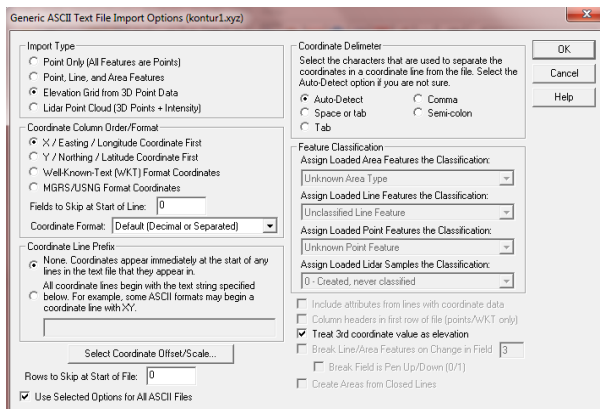
Gambar 4. 11 Kontur Aliran Sungai Keser Bendungan Tugu

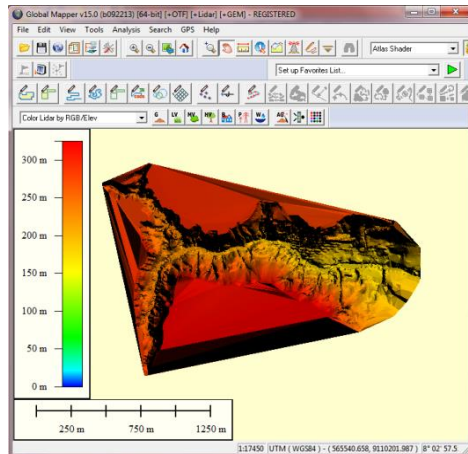
Kontur sungai berformat DXF kemudian disimpan ulang menjadi file XYZ dengan menggunakan *software* DXF2XYZ (Gambar 4.12). Kemudian file XYZ tersebut dimasukkan ke dalam *software* Global Mapper untuk mengetahui kontur daerah sekitar aliran Sungai Keser.



Gambar 4. 12 Penggunaan *Software* DXF2XYZ

Setelah membuka *software* Global Mapper, langkah pertama sebelum memasukkan file kontur XYZ adalah mengatur zona dan datum pada menu *Tools/Configure* (Gambar 4.13). Pada kotak pemilihan *Projection* dipilih UTM dan Zona dipilih -49 Southern, menyesuaikan dengan lokasi Bendungan Tugu Trenggalek. Selanjutnya memasukkan file XYZ dan pada kotak pilihan *import options* bagian *import type* dipilih *Elevation Grid from 3D Point Data* (Gambar 4.14). Sehingga muncul kontur daerah aliran Sungai Keser sebagaimana pada gambar 4.15

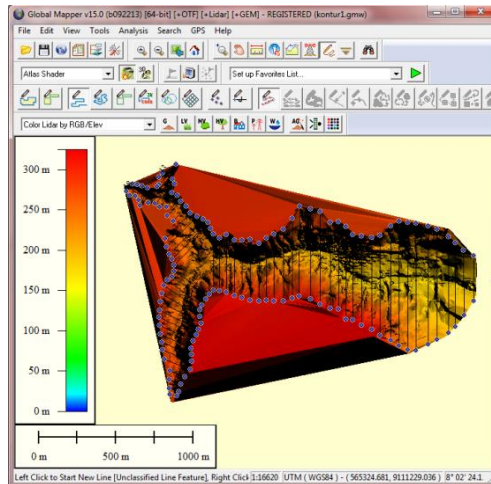
Gambar 4. 13 Kotak Editor *Configuration* Global MapperGambar 4. 14 Kotak *Import Options*



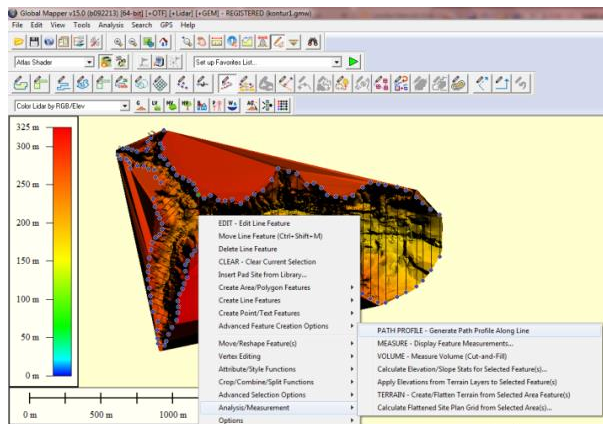
Gambar 4. 15 Tampilan Kontur Sungai pada Global Mapper

Untuk mengetahui *cross section* sungai pada bagian yang diinginkan terlebih dahulu dibuat *line* (garis) dengan menggunakan *digitizer tool*. Dalam tugas akhir ini aliran sungai dibagi menjadi 60 bagian (Gambar 4.16), dimana jumlah tersebut tidak menjadi patokan namun semakin banyak maka *cross section* semakin padat dan semakin detail. Ditambah dalam tugas akhir ini yang ditinjau adalah bagian tampungan bendungan sehingga bagian hulu harus cukup rapat agar lebih teliti.

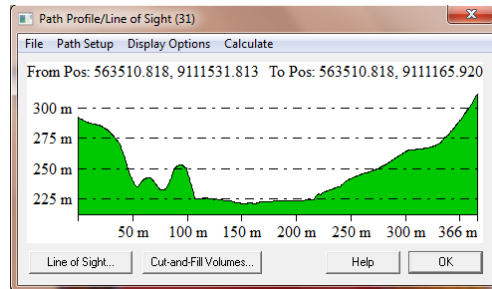
Peninjauan penampang sungai dilakukan dengan cara klik kanan pada garis, pilih *Analysis/Measurement/Path Profile-Generate path profile along line* (Gambar 4.17), maka akan muncul hasil *Path Profile* (Gambar 4.18). Selanjutnya dengan memilih menu *File/ Save CSV File*, akan tersimpan data *distance* dan *elevation* dalam file MS.Excel (Gambar 4.19). Data *cross section* dalam format MS.Excel ini mempermudah dalam memasukkan *cross section coordinates* sungai dalam software HEC-RAS.



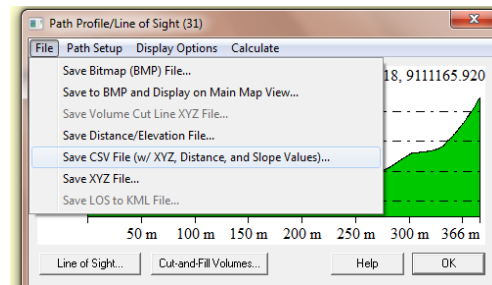
Gambar 4. 16 Garis Potongan Penampang Sungai



Gambar 4. 17 Analisis *Path Profile* pada Global Mapper



Gambar 4. 18 Hasil *Path Profile* Salah Satu *Cross section* Sungai




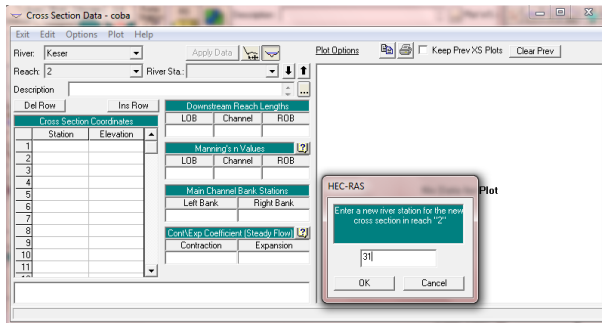
Gambar 4. 19 Penyimpanan *Cross section* ke CSV File

Hasil data geometri potongan melintang sungai dari Global Mapper berupa tabel jarak dan elevasi. Salah satu contoh untuk RS 31 dapat dilihat pada tabel 4.1. Sedangkan untuk data potongan melintang pada *River Station* lain dilampirkan pada Lampiran Tabel 1 sampai Lampiran Tabel 6.

Tabel 4. 1 Jarak dan Elevasi RS 31

No	Station	Elevation	No	Station	Elevation	No	Station	Elevation
1	0	292.383	19	122.250	224.886	37	244.49	238.849
2	4.289	290.059	20	126.530	224.677	38	250.92	242.184
3	8.579	288.194	21	132.970	223.699	39	261.65	246.051
4	15.013	286.734	22	143.690	222.059	40	265.94	247.012
5	19.302	285.74	23	147.980	221.437	41	272.37	249.135
6	25.736	282.578	24	154.420	221.306	42	283.09	254.174
7	30.025	279.256	25	158.700	221.548	43	287.38	256.638
8	40.748	263.711	26	165.140	222.075	44	293.82	260.499
9	47.182	245.664	27	175.860	222.963	45	298.11	262.842
10	51.472	237.483	28	186.580	223.106	46	304.54	265.271
11	57.906	239.171	29	190.870	223.158	47	308.83	265.731
12	68.629	240.107	30	197.310	223.308	48	315.26	266.450
13	72.918	234.973	31	201.600	223.462	49	319.55	266.963
14	79.352	232.953	32	208.030	223.885	50	325.99	268.637
15	83.642	238.916	33	218.750	228.230	51	336.71	275.936
16	90.075	251.517	34	229.480	232.000	52	341	280.071
17	100.800	245.270	35	233.770	233.456	53	347.43	286.921
18	111.52	225.007	36	240.200	235.334	54	351.72	291.854

Potongan melintang Sungai Keser dimasukkan dengan memilih menu *Cross section* (). Untuk memasukkan suatu potongan melintang terlebih dulu pilih *River* dan *Reach* potongan yang akan dimasukkan. Kemudian pilih menu *Options/Add a New Cross section Data* lalu menuliskan nama *River Station* (Gambar 4.20). Penomoran *River Station* (RS) dimulai dari hilir, berurutan makin ke hulu semakin besar. Selanjutnya mengisi *cross section coordinate* dengan meng-copy tabel *Distance Total* dan *Elevation* dari file CSV lalu paste ke tabel *station* dan *elevation*.



Gambar 4. 20 Kotak Penamaan *River Station* dalam pembuatan potongan melintang Sungai Kaser

➤ Downstream *Reach* Lengths

Panjang aliran sungai yang dimaksud dalam HEC-RAS ini adalah jarak *cross section* tersebut dihitung dari *cross section* hilirnya. Dimana jarak ini diukur di tiga titik antara lain jarak antar bantaran kiri (*left overbank, LOB*), jarak antar alur utama (*main channel, Channel*), dan jarak antar bantaran kanan (*right overbank, ROB*). Sehingga pada penampang RS 1, yaitu penampang paling hilir ketiganya diisi angka nol. Sedangkan untuk RS2 jarak diukur dari RS 2 ke RS 1 (RS hilirnya), begitu seterusnya untuk RS selanjutnya. Nilai jarak LOB, *Channel*, dan ROB tersebut sebagaimana pada tabel 4.2

Tabel 4. 2 Daftar LOB, Channel, dan ROB Sungai Keser

RS	LOB	Channel	ROB	RS	LOB	Channel	ROB	RS	LOB	Channel	ROB
1	0	0	0	21	91.382	63.522	45.24	41	59.899	38.591	35.012
2	75.04	69.165	112.22	22	93.308	73.986	61.258	42	34.864	35.651	45.924
3	71.373	56.836	93.754	23	67.081	63.524	62.78	43	93.822	34.569	59.931
4	58.163	43.317	58.136	24	56.213	49.401	47.519	44	24.809	46.334	69.559
5	89.933	74.996	86.463	25	59.568	52.296	48.049	45	349.46	192.42	35.482
6	64.458	60.46	67.715	26	64.155	60.986	59.045	46	39.585	37.32	35.608
7	80.206	80.031	89.067	27	51.793	51.662	53.341	47	35.814	41.068	47.609
8	51.164	52.115	53.078	28	47.4	48.993	51.493	48	44.263	38.507	32.803
9	57.722	58.604	60.81	29	63.731	60.062	56.856	49	50.042	48.007	46.391
10	61.888	53.941	65.444	30	49.792	45.075	45.311	50	55.522	49.638	45.491
11	90.346	70.213	75.673	31	49.421	44.235	41.844	51	57.89	49.846	43.161
12	54.796	53.223	64.309	32	38.424	166.82	300.61	52	43.767	41.089	39.169
13	67.613	69.059	71.46	33	41.867	42.516	43.166	53	51.966	46.356	44.554
14	58.819	62.225	67.322	34	38.993	36.465	36.104	54	59.842	53.845	49.514
15	65.069	50.969	43.501	35	46.68	45.439	51.493	55	53.282	46.723	40.165
16	60.38	71.083	83.912	36	47.339	44.257	52.407	56	44.881	43.647	42.72
17	51.254	50.867	51.165	37	51.097	80.422	125.2	57	66.622	59.425	54.772
18	98.983	83.17	71.581	38	47.604	49.293	51.173	58	78.725	59.965	57.552
19	61.38	64.431	68.74	39	44.881	49.523	56.102	59	59.64	55.765	54.433
20	75.515	76.231	77.017	40	37.473	39.702	44.19	60	57.592	53.177	50.213

➤ Manning's n Values

$$V = 1/n \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

Keterangan:

V = Kecepatan aliran (m/dt)

R = Radius hidrolik (m)

S = Kemiringan

n = Koefisien kekasaran Manning

Dalam tugas akhir ini, nilai koefisien kekasaran Manning ditentukan oleh konsultan perencana Bendungan Tugu, yaitu sebesar 0,030 pada daerah aliran sungai. Nilai tersebut sama untuk bagian LOB, *Channel*, dan ROB karena sungai dianggap penampang tunggal, bukan penampang majemuk.

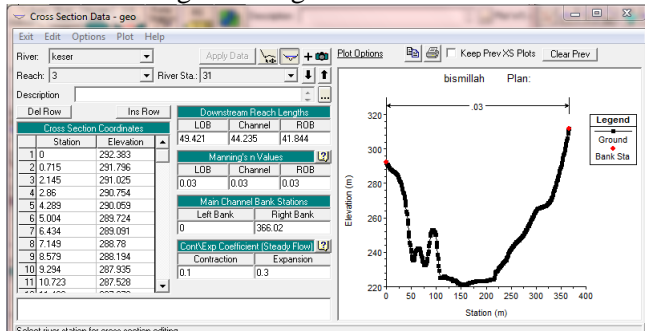
➤ Main Channel Bank Stations

Main Channel Bank Stations adalah titik batas antara LOB dan *Channel* serta antara *Channel* dan ROB. Karena tampang merupakan tampang tunggal maka seluruh tampang merupakan *main channel*. Sehingga *Left Bank* diisi nol dan *Right Bank* diisi dengan nilai *station* terakhir.

➤ Cont/Exp Coefficients

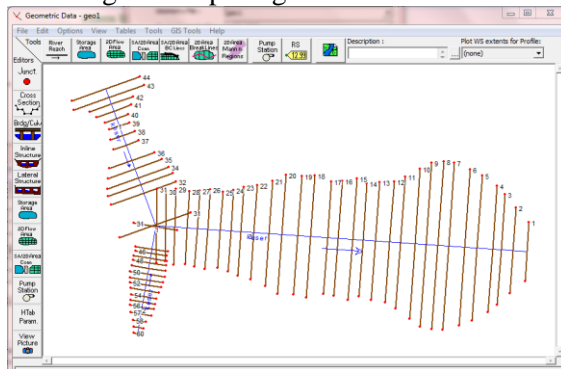
Contraction Coefficients dibiarkan sesuai *default* pada HEC-RAS yaitu 0.1. Begitu pula untuk *Expansion Coefficients* dibiarkan *default* 0.3, dan berlaku untuk semua *River Station*.

Pengisian semua data pada kotak *Cross section Editor* akan menampilkan *preview* dari potongan melintang pada RS tersebut, pada sisi kanan sebagaimana gambar 4.21



Gambar 4. 21 Tampilan *Cross section Data* Setelah *Input*


Pembuatan potongan melintang Sungai Keser dilakukan dengan cara yang sama untuk semua RS lain pada semua *Reach*. Setelah semua *cross section* selesai dibuat, maka pada layar geometri data tampilan geometri dari seluruh aliran Sungai Keser akan terlihat sebagaimana pada gambar 4.22

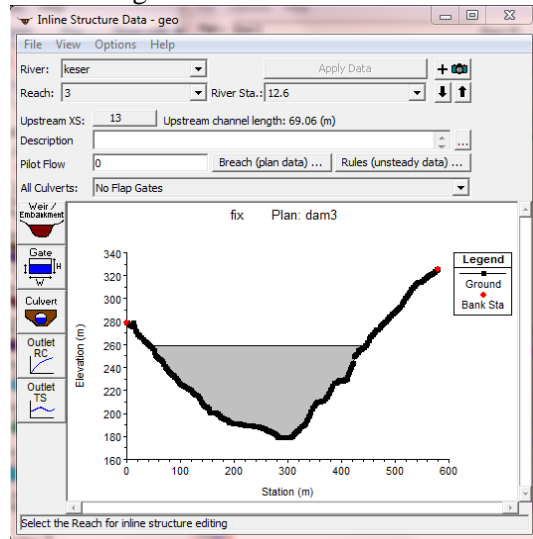


Gambar 4. 22 Tampilan Geometri Data Sungai Keser

4.1.1.3. Struktur Melintang Sungai

HEC-RAS mampu memodelkan struktur melintang sungai seperti bendungan, bendung, pintu pelimpah, jembatan, dan gorong-gorong.

Penentuan geometri bendungan dilakukan dengan menu *Edit and/or create inline structure* (ikon ) , kemudian mengaktifkan lokasi bendungan *River: Keser* dan *Reach: 3*. Klik menu *Options/Add an Inline Structure*, kemudian menuliskan STA tampang lintang baru 12,6. Kotak editor data *inline structure* akan muncul (Gambar 4.23), kemudian pilih *Weir/Embankment* pada *toolbar* bagian kiri dan mengisi data geometri *weir*.



Gambar 4. 23 Kotak Editor Inline Structure Data

Data geometri bendungan tersebut antara lain (Gambar 4.24):

- *Distance*, adalah jarak dari penampang melintang hulu bendungan (STA 13) yaitu 20m.
- *Width*, adalah lebar puncak bendungan yaitu 12 m
- *Weir coef*, adalah koefisien aliran yaitu 2,18 m

- *Edit station and elevation coordinates*, adalah data penampang melintang bendungan dimana elevasinya semua diisi elevasi puncak bendungan yaitu 259 m.
- *US Embankment SS* adalah kemiringan hulu tubuh bendungan, yaitu 2,25.
- *DS Embankment SS* adalah kemiringan hilir tubuh bendungan, yaitu 2.
- *Weir Crest Shape*, adalah bentuk puncak bendungan, dimana ada dua kriteria yaitu bentuk trapezoidal *Broad Crested Weir* (FHWA,1978) dan bentuk *Ogee Spillway* (COE,1965). Sehingga harus memilih diantara keduanya mana yang paling cocok, dan jika dipilih bentuk Ogee maka dibutuhkan informasi tambahan yaitu "*Spillway Approach Height*" yang merupakan selisih antara elevasi puncak *spillway* dengan elevasi rata-rata dasar hulu *spillway* dan "*Design Energy Head*" yang merupakan selisih elevasi garis tinggi energi desain dengan elevasi puncak *spillway*. Pada tugas akhir ini dipilih bentuk *Broad Crested Weir*

Inline Structure Weir Station Elevation Editor

Distance	Width	Weir Coef
20	12	2.18

Clear Del Row Ins Row Filter...

Edit Station and Elevation coordinates

Station	Elevation
1 1.133	259
2 3.4	259
3 4.534	259
4 6.801	259
5 7.934	259
6 10.201	259
7 11.335	259
8 13.612	259

U.S. Embankment SS 2.25 D.S. Embankment SS 2

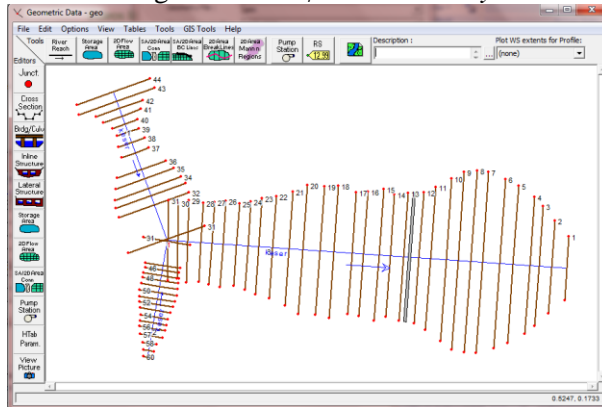
Weir Data
Weir Crest Shape
☒ Broad Crested
☐ Ogee

OK Cancel

Enter distance between upstream cross section and deck/roadway. (m)

Gambar 4. 24 Kotak Editor Data Geometri Bendungan

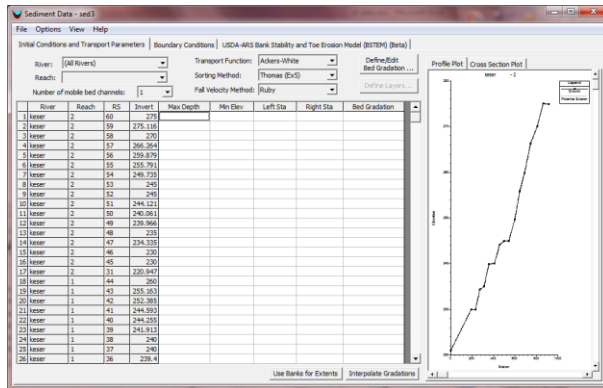
Setelah melakukan input data geometri bendungan, pada layar utama *Geometric Data* akan terlihat sebagaimana gambar 4.25 Sebelum melakukan input data lain dan meninggalkan kotak editor data geometri, terlebih dahulu dilakukan penyimpanan *Geometric Data* dengan cara *File/Save Geometry Data*.



Gambar 4. 25 Tampilan Geometric Data Setelah Input Bendungan

4.1.2. Data Sediment

Untuk mengakses editor data sedimen pilih *Enter/Edit sediment boundary condition* (SED) maka akan muncul kotak editor sedimen data (Gambar 4.26). Sebelum memasukkan data terlebih dahulu buat file data sedimen dengan memilih menu *File/ New Sediment Data*, tuliskan nama file lalu klik OK. Pada kotak sedimen data terdapat tiga tab, yaitu *Initial Conditions and Transport Parameters*, *Boundary Conditions*, dan *USDA-ARS Bank stability and Toe Erosion Model (BSTEM) (Beta)*. Pada tab pertama, *Initial Conditions and Transport Parameter*, dapat diatur antara lain rumus *transport* sedimen, metode pengurutan, metode kecepatan jatuh, volume kontrol sedimen, dan gradasi sedimen.

Gambar 4. 26 Kotak Editor *Sediment Data*

➤ *Transport Function*

Rumus *transport* sedimen yang dapat dipilih antara lain Ackers and White, Englund and Hansen, Laursen(Copeland), Meyer Peter Muller, Toffaleti, MPM-Toffaleti, Yang, and Wilcock-Crowe. Hasil *transport* sedimen sangat bergantung pada rumus yang dipilih, sehingga perlu dipilih metode yang paling sesuai dengan kondisi yang paling mendekati. Dalam menentukan rumus *transport* sedimen yang digunakan ada beberapa prosedur yang dipertimbangkan antara lain ketersediaan jenis data yang dapat diperoleh atau diukur sesuai dengan kebutuhan dari persamaan tersebut dan kesesuaian rumus dengan kondisi yang ada. Di Sungai Keser ini digunakan persamaan Laursen dengan pertimbangan yaitu data variable dari persamaan ini tersedia dan kondisi diameter sedimen yang ada sesuai dengan Laursen yang diperuntukkan untuk pasir halus sampai lanau.

➤ *Sorting Method*

HEC-RAS memasukkan tiga algoritma untuk mensimulasikan *bed sorting* dan *armoring*. Ketiga algoritma membagi lapisan dasar menjadi dua yaitu lapisan aktif dan lapisan inaktif. Lapisan aktif adalah lapisan yang materialnya tertransportasi secara aktif. HEC-RAS mensimulasikan kapasitas

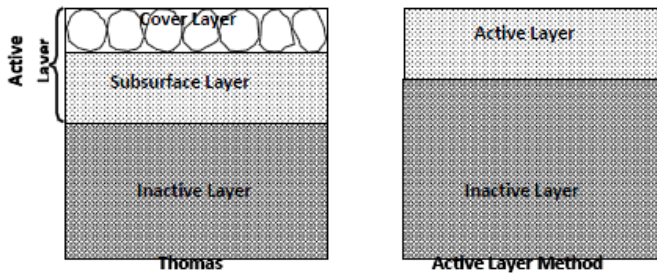
transport berdasarkan gradasi pada lapisan aktif, tidak pada semua dasar saluran.

Tiga metode yang tersedia antara lain:

1. Thomas (Exner-5). Ada tiga lapisan pada metode ini, dimana pada lapisan aktif terdapat lapisan dan lapisan subsurface. Jika lapisan dengan gradasi yang lebih halus tererosi lebih dulu daripada lapisan kasar atau lapisan *cover* maka lapisan aktif akan tertransportasi.

2. *Active Layer*. Metode ini tidak mensimulasikan lapisan *cover* sebagai lapisan teratas pada *active layer* (Gambar 4.27)

3. Copeland (Ex-7). Metode ini melakukan pendekatan sebagaimana metode Thomas dengan perubahan kritis



Gambar 4. 27 Skema *Sorting and Armoring Methods* HEC-RAS

➤ *Fall Velocity Method*

Metode kecepatan jatuh yang terdapat dalam pilihan antara lain Ruby, Toffaleti, Van Rijn, Report 12, dan Dietrich. Pada tugas akhir ini digunakan metode kecepatan jatuh Ruby yang merupakan metode *default* pada HEC-RAS, selain itu metode ini juga dapat berlaku pada semua kondisi butir sedimen baik gravel, pasir dan lanau.

➤ *Maximum Depth or Minimum Elevation*

Ketebalan sedimen sebagai kontrol volume sedimen dapat diatur dengan kolom *Max Depth* atau *Min Elev*. *Max depth* (kedalaman maximum) mengatur sedimen pada software untuk menghitung elevasi minimum yang tererosi, yaitu selisih antara elevasi dasar dengan *Max Depth*. Sedangkan *Min Elev* mengatur

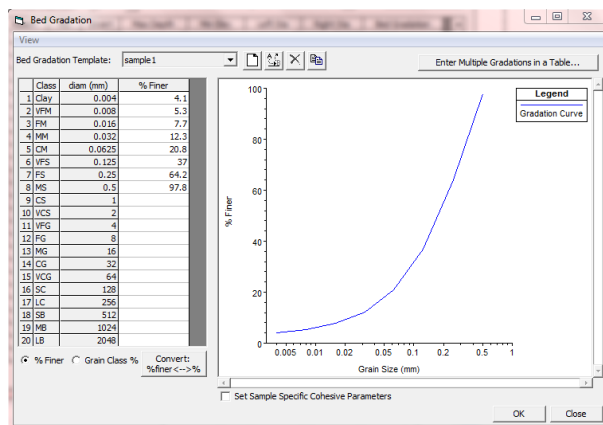
agar pada model elevasi ini tidak tererosi, bagian yang bisa tererosi hanyalah sebatas elevasi diatas elevasi minimum yang ditentukan. Jika elevasi minimum yang diisikan adalah elevasi dasar maka dianggap pada saluran tidak terdapat degradasi. Pada topik tugas akhir ini tidak berpengaruh apakah dipilih *Max Depth* ataupun *Min Elev*.

➤ *Mobile Cross section Limits*

Mobile Cross section Limit merupakan batas dari *transport* sedimen yang disimulasikan dengan batas kiri yaitu *Left Sta* dan batas kanan yaitu *Right Sta*

➤ *Bed Gradation*

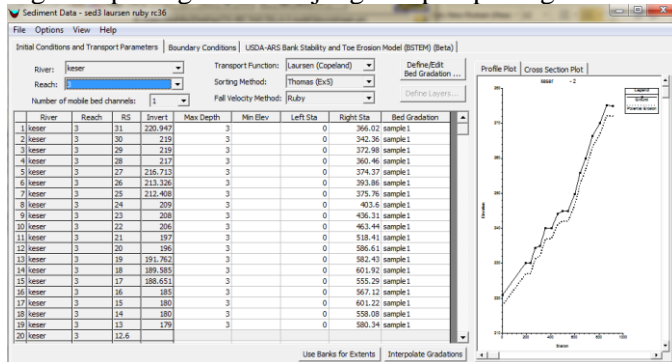
Gradasi ukuran butiran dimasukkan dengan memilih menu *Define/Edit Bed Gradation Button* pada layar utama kotak editor *sediment data*. Kemudian akan muncul tabel *bed gradation* yang dimana menginput persentase butiran pada sampel yang diambil (Gambar 4. 28)



Gambar 4. 28 Editor *Bed Gradation*

Kolom *Bed Gradation* diisi sesuai data sampel *bed gradation* yang ada, bisa pula diinterpolasi gradasinya dengan memilih

menu *Interpolate Gradations* yang terdapat pada bagian bawah. Pengisian kotak editor *Initial Conditions and Transport Parameters* dilakukan pada poin-poin yang disebut diatas (Gambar 4.29). Pada sisi kanan akan tampak gambar plotting baik potongan memanjang maupun potongan melintang.



Gambar 4. 29 Pengisian Kotak Editor *Initial Conditions and Transport Parameters*

Selanjutnya Tab kedua adalah *Sediment Boundary Conditions* dimana sedimen dapat diatur pada lokasi yang diinginkan. *Sediment boundary conditions* ini otomatis harus dispesifikasikan pada semua *external boundary conditions*, dan dapat ditambahkan lateral boundary condition sesuai kebutuhan.

Sedangkan tipe *boundary condition* sendiri terbagi menjadi tiga, antara lain *Rating Curve*, *Sediment Load Series* dan *Equilibrium Load*. Pada tugas akhir ini tipe *boundary condition* yang dipilih adalah *Rating Curve* (Gambar 4.30) yang artinya semakin besar debit maka semakin besar kecepatan aliran sehingga semakin besar juga sedimen yang terangkut. Tipe *rating curve* ini harus mengisi tabel *flow-load* (Gambar 4.31).



Gambar 4. 30 Kotak *Sediment Boundary Condition Type*

Rating Curve for kesser 2 60

Number of flow-load points 36 sets

	0.61	0.62	0.69	0.76	0.76	0.77	0.92
Flow (m ³ /s)	13.8269	14.1131	15.7561	17.2469	17.21	17.5764	20.8401
Total Load (tonnes/day)	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
1 Clay (0.002-0.004)	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
2 VFM (0.004-0.008)	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
3 FM (0.008-0.016)	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3
4 MM (0.016-0.032)	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8
5 CM (0.032-0.0625)	37	37	37	37	37	37	37
6 VFS (0.0625-0.125)	64.2	64.2	64.2	64.2	64.2	64.2	64.2
7 FS (0.125-0.25)	97.8	97.8	97.8	97.8	97.8	97.8	97.8
8 MS (0.25-0.5)	100	100	100	100	100	100	100
9 CS (0.5-1)							
10 VCS (1-2)							
11 VFG (2-4)							
12 FG (4-8)							
13 MG (8-16)							
14 CG (16-32)							
15 VCG (32-64)							

☐ Define Diversion Load


Gambar 4. 31 Kotak Editor *Rating Curve*

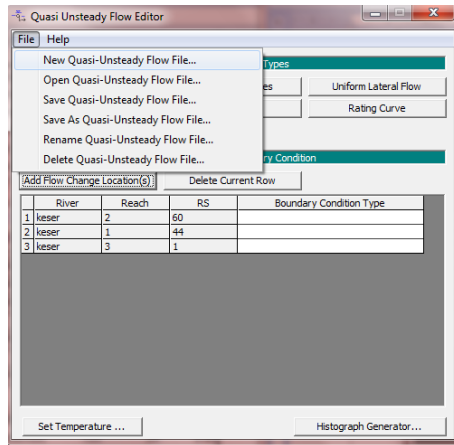
Besarnya nilai debit dan angkutan sedimen yang terjadi diperoleh dari data perhitungan Konsultan Bendungan Tugu sebagaimana pada Tabel 4.3 berikut

Tabel 4. 3 Data Debit dan Total Angkutan Sedimen

No	Debit (m ³ /dt)	Angkutan Sedimen (ton/hari)	No	Debit (m ³ /dt)	Angkutan Sedimen (ton/hari)	No	Debit (m ³ /dt)	Angkutan Sedimen (ton/hari)
1	0.61	13.827	13	1.16	26.524	25	2.15	48.875
2	0.62	14.113	14	1.18	26.764	26	2.87	65.408
3	0.69	15.756	15	1.19	27.007	27	2.95	67.298
4	0.76	17.247	16	1.23	28.104	28	3.06	69.742
5	0.76	17.210	17	1.31	29.795	29	3.19	72.556
6	0.77	17.576	18	1.5	34.156	30	3.25	74.110
7	0.92	20.840	19	1.7	38.813	31	3.36	76.597
8	0.94	21.394	20	1.74	39.527	32	3.5	80.006
9	0.96	21.853	21	1.77	40.351	33	3.52	80.400
10	0.97	22.156	22	1.78	40.641	34	3.74	85.835
11	1.09	24.906	23	1.88	42.769	35	4	92.285
12	1.09	24.904	24	2.09	47.534	36	4.12	95.194

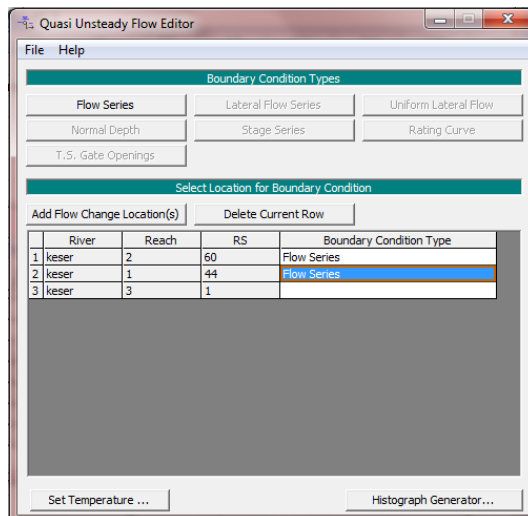
4.1.3. Data Quasi-Unsteady Flow

Untuk melakukan input data debit quasi-unsteady pilih menu *Enter/Edit quasi-unsteady flow data* () pada layar menu utama HEC-RAS. Sebelum memasukkan data, terlebih dahulu membuat file debit dengan cara memilih menu *File/New Quasi-Unsteady Flow File* (Gambar 4.32), lalu tulis nama file dan lokasi yang diinginkan, klik OK.



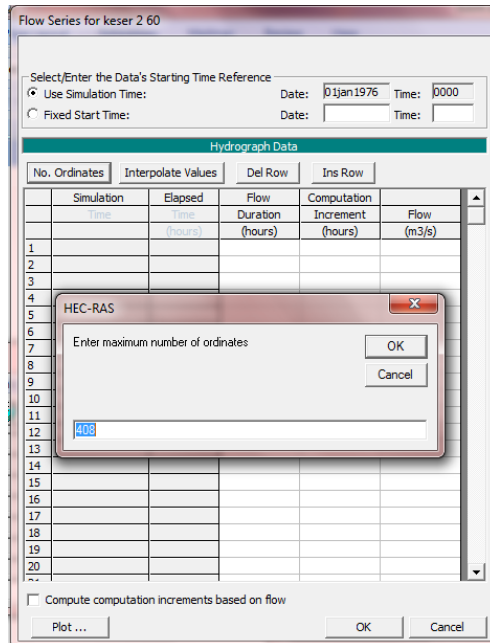
Gambar 4. 32 Menyimpan File Quasi-Unsteady Flow

Boundary Condition Type untuk RS hulu pilih *Flow Series*(Gambar 4.33) lalu akan muncul kotak editor *flow series*



Gambar 4. 33 *Boundary Condition Quasi-Unsteady Flow* RS Hulu

Jumlah data yang ingin kita masukkan dalam perhitungan seringkali banyak, sehingga perlu jumlah data lebih banyak. Untuk menambahkan data tersebut pilih menu *No.ordinates* lalu masukkan banyak baris yang diinginkan sebagaimana gambar 4.34 berikut.



Gambar 4. 34 Menambahkan Jumlah Data pada Flow Series

Data yang diisi pada kotak editor *Flow Series*(Gambar 4.35) antara lain:

- *Data Starting Time reference*, adalah waktu awal dari data yang digunakan. Pada tugas akhir ini menggunakan *Fixed Start Time* 01 Januari 1998.
- *Flow Duration*, adalah berapa lama durasi dari besarnya debit tersedia yang dimasukkan. Pada tugas akhir ini *flow duration* adalah satu bulan yang dikonversikan dalam satuan jam.

- *Computation Increment*, adalah selang langkah waktu (time step) HEC-RAS menghitung aliran, yang artinya dalam rentang waktu selama flow duration tersebut HEC-RAS melakukan perhitungan aliran (*steady flow analysis*) setiap *computational increment*. Misalkan dalam pada bulan Januari, HEC-RAS menghitung *steady flow* setiap satu jam sampai seluruh waktu 744 jam, setiap kali hitungan menggunakan debit 2.34 m/detik.
- *Flow*, adalah besarnya debit tersedia. Besar debit bulanan ditunjukkan oleh Lampiran Tabel 7 dan Lampiran Tabel 8

Flow Series for keser 2 60

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

☐ Use Simulation Time: Date: 01Jan1976 Time: 0000

☒ Fixed Start Time: Date: 01JAN1976 Time: 0000

Hydrograph Data

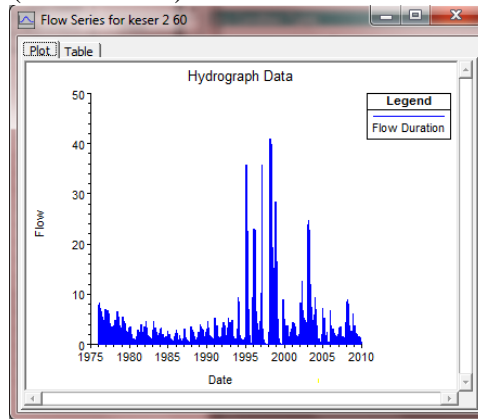
No. Ordinates	Interpolate Values	Del Row	Ins Row	
Simulation Time	Elapsed Time (hours)	Flow Duration (hours)	Computation Increment (hours)	Flow (m3/s)
1	01Jan1976 0000	744	744	24 7.87
2	01Feb1976 0000	1440	696	24 8.15
3	01Mar1976 0000	2184	744	24 7.19
4	01Apr1976 0000	2904	720	24 6.46
5	01May1976 0000	3648	744	24 5.45
6	01Jun1976 0000	4368	720	24 5.37
7	01Jul1976 0000	5112	744	24 4.98
8	01Aug1976 0000	5856	744	24 4.75
9	01Sep1976 0000	6576	720	24 4.68
10	01Oct1976 0000	7320	744	24 4.55
11	01Nov1976 0000	8040	720	24 6.85
12	01Dec1976 0000	8784	744	24 5.35
13	01Jan1977 0000	9528	744	24 5.7
14	01Feb1977 0000	10200	672	24 6.36
15	01Mar1977 0000	10944	744	24 6.76
16	01Apr1977 0000	11664	720	24 6.11
17	01May1977 0000	12408	744	24 4.11
18	01Jun1977 0000	13128	720	24 4.03
19	01Jul1977 0000	13872	744	24 3.72
20	01Aug1977 0000	14616	744	24 3.52

☐ Compute computation increments based on flow

Plot ... OK Cancel

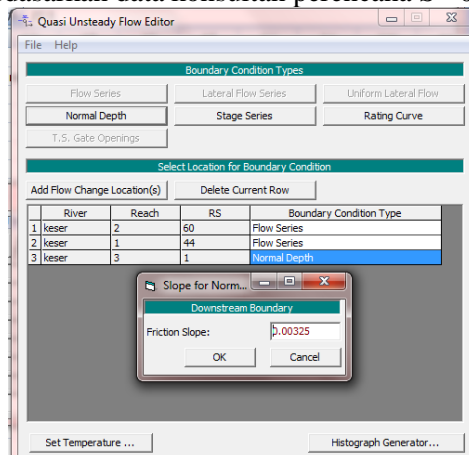
Gambar 4. 35 Kotak Editor *Flow Series*

Grafik hubungan debit dan waktu (hidrograf) juga dapat dilihat dengan memilih menu Plot pada bagian kiri bawah *Flow Series Editor* (Gambar 4.36)



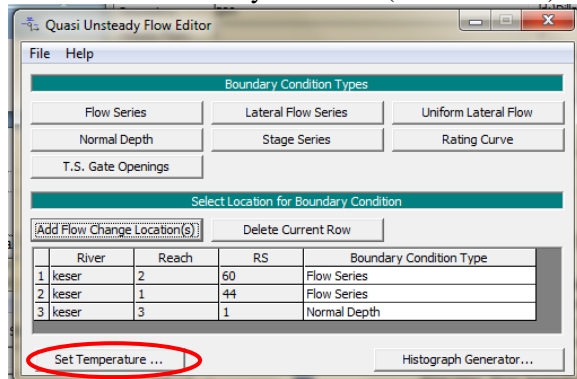
Gambar 4. 36Hidrograph Plot Flow Series Data

Boundary Condition Type untuk bagian hilir sungai yaitu *reach 3* dipilih *Normal Depth*, maka akan muncul kotak *Friction Slope* atau kemiringan garis energi (Gambar 4.37). Pada tugas akhir ini, berdasarkan data konsultan perencana $S = 0.00325$

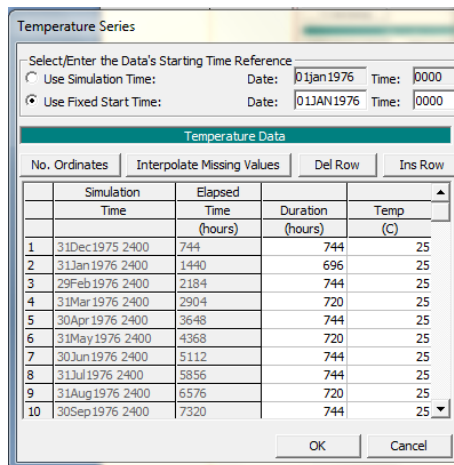


Gambar 4. 37Boundary Condition Quasi-Unsteady Flow RS Hilir

Beberapa aspek dari mekanika *transport* sedimen, terutama kecepatan jatuh, sensitif terhadap suhu air maka HEC-RAS memerlukan informasi suhu. Untuk memasukkan data suhu klik *Set Temperature* pada bagian kiri bawah layar editor *Quasi-Unsteady Flow* (Gambar 4.38). Maka akan muncul layar editor *Temperature Data*, isi sesuai dengan data. Pada tugas akhir ini diasumsikan suhu air normal yaitu 25°C (Gambar 4.39)




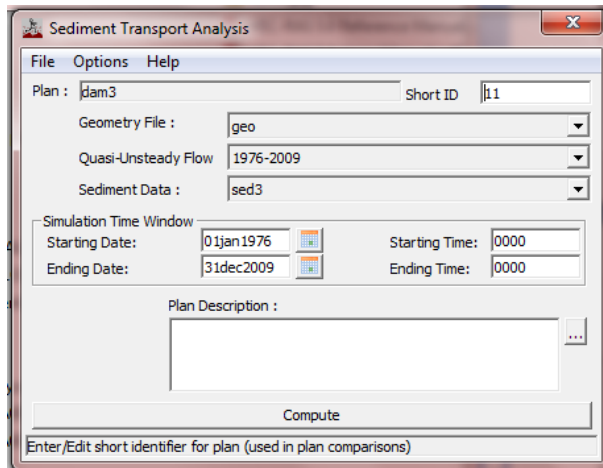
Gambar 4. 38 *Quasi-Unsteady Flow* Editor



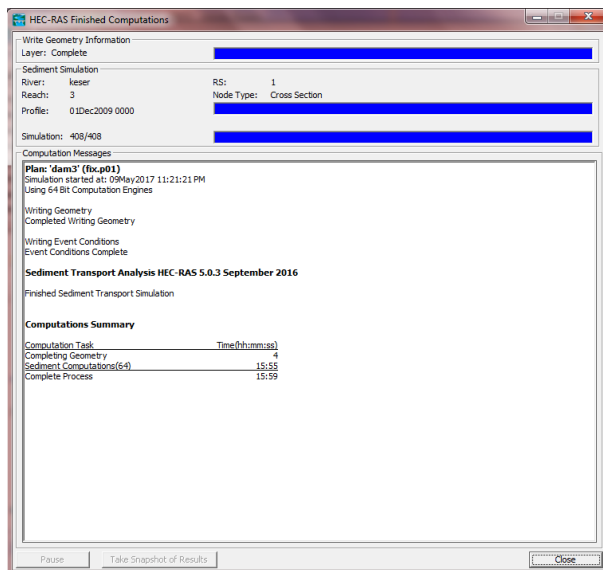
Gambar 4. 39 Kotak Editor *Temperature Series*

4.1.4. *Running Sediment Analysis*

Analisis *Sedimentasi Run/Sediment Analysis* atau memilih menu *Performing a Sediment Transport Computation* (). Kemudian akan muncul kotak *Sediment Transport Analysis* (Gambar 4.40). Untuk melakukan *running model transport* sedimen, harus dibuat *Plan file*. Pembuatan file dilakukan dengan memilih menu *File/New Plan* kemudian beri nama dan klik OK. Setelah itu isikotak penamaan ID yang muncul. Pada kotak *Sediment Analysis* cek file *Geometry*, *Quasi-Steady Flow*, dan *Sediment Data* yang dipilih. *Simulation Time Window* juga harus diisi sesuai dengan data time series yang digunakan sebelumnya pada *quasi-unsteady flow data*. *Time Window* ini terdiri *Starting Date* dan *Ending Date* dengan format DDMMYYYY, sedangkan *Starting Time* dan *Ending Time* diisi dengan format HHMM dalam sistem waktu 24 jam. *Time Window* ini bisa diatur lebih panjang dibanding data yang dimasukkan namun tidak bisa lebih pendek. Pada tugas ini starting date “01Jan1976” dan starting time “0000” sedangkan ending date “31Dec2009” dan ending time “2400”. Mulai *running* dengan meng-klik “*Compute*”. Proses simulasi akan berjalan pada box HEC-RAS *Computations* ditandai dengan bar berwarna biru, jika proses *running* berhasil tanpa error maka bar *Writing Geometry Information*, *Sediment Simulation*, dan *Simulation* berwarna biru penuh dan disertai keterangan “*Finished Sediment Transport Simulation*” (Gambar 4.41)





Gambar 4. 40 Kotak *Sediment Transport Analysis*

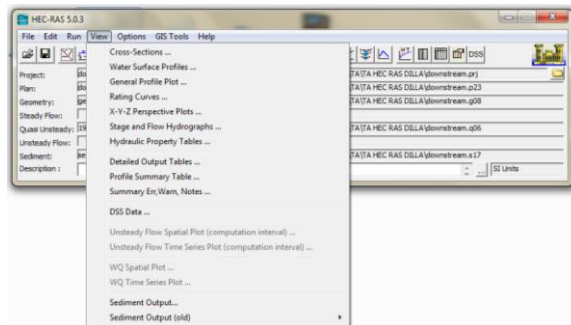


Gambar 4. 41Kotak *HEC-RAS Computations* setelah simulasi

4.1.5. *Output Data*

Output dari HEC-RAS dapat berupa grafik, tabel, gambar profil hidrolika ataupun gambar potongan. Sebelum melihat output hasil perhitungan sebaiknya mengecek terlebih dulu kesalahan terjadi dengan cara klik menu  atau pilih menu *View/Summary of Errors, Warnings, and Notes*.

Hasil simulasi dapat ditampilkan dengan cara klik menu *View* kemudian pilih output apa yang ingin dilihat, antara lain *Cross sections, Water Surface Profile, General Profile Plots, X-Y-Z Perspective Plots, Stage and Flow Hydrograph, Hydraulic Property Table, Detailed Output Table, Profile Summary Table*, dst (Gambar 4.42), yang juga dilihat dengan memilih menu output pada layar utama HEC-RAS ().

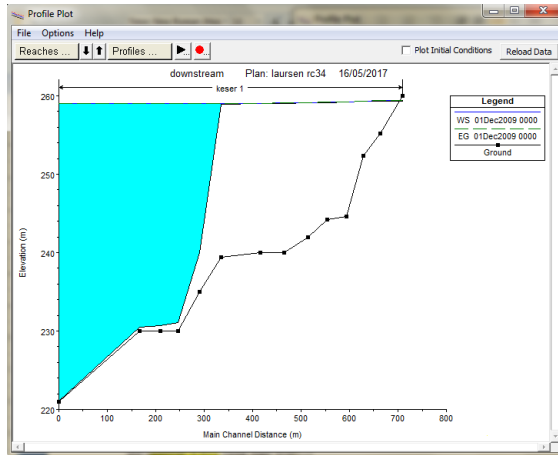


Gambar 4. 42 Menu View HEC-RAS

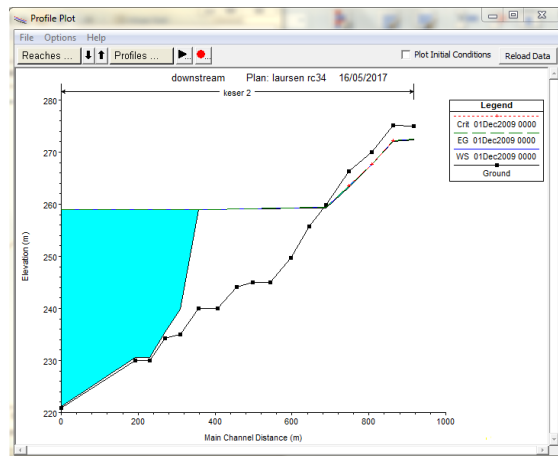
Untuk menampilkan potongan memanjang pilih menu *View/General Profile Plot* atau klik menu *View Profile* ().

4.1.6. *Pemodelan Pertama*

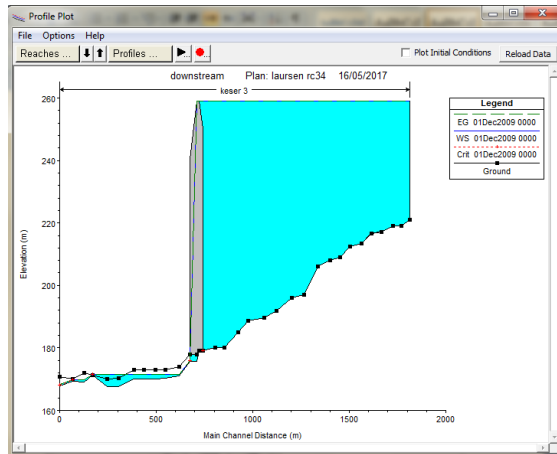
Output potongan memanjang dari model pertama yang dilakukan dengan *running* data selama 34 tahun pada daerah *upstream* (*reach 1* dan *reach 2*) ditunjukkan oleh gambar 4.43 dan gambar 4.44, sedangkan untuk daerah *downstream* ditunjukkan oleh gambar 4.45.



Gambar 4. 43 Profile Plot Reach 1 pada tahun ke 34.



Gambar 4. 44 Profile Plot Reach 2 pada tahun ke 34.



Gambar 4. 45 Profile Plot Reach 3 pada tahun ke 34.

Pada output pemodelan pertama terlihat *sedimentasi* yang terjadi hanya pada *reach* hulu, sedangkan pada *reach* bagian hilir (setelah percabangan) tidak terjadi *sedimentasi*. Hal ini dikarenakan kecepatan pada *reach* tersebut bernilai nol, sehingga tidak ada pula *sedimentasi* pada *reach* tersebut.

4.1.7. Pemodelan Kedua

Pemodelan kedua dibuat dengan memodelkan pelimpah dengan data pelimpah dari konsultan perencana sebagai berikut:

lebar ambang : 22,00 m
 elevasi ambang : + 251,00 m
 tinggi ambang : 8,00 m.

Penambahan pelimpah dilakukan dengan cara merubah elevasi tubuh bendungan sesuai elevasi ambang pelimpah yaitu +251,00 dan pada *station* sepanjang lebar ambang yaitu 22 meter (Gambar 4.46). Setelah semua data geometri tersebut dimasukkan, klik OK, sehingga gambar weir akan tampak pada kotak editor *inline structure* (Gambar 4.47).

Inline Structure Weir Station Elevation Editor

Distance	Width	Weir Coef
20	12	2.18

Clear Del Row Ins Row Filter ...

Edit Station and Elevation coordinates

	Station	Elevation
189	321.91	259.
190	323.04	259.
191	325.31	251.
192	326.44	251.
193	328.71	251.
194	329.84	251.
195	332.11	251.
196	333.74	251.

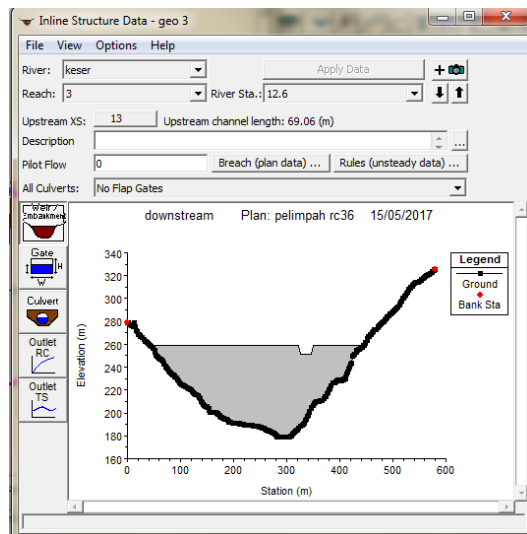
U.S Embankment SS 2.25 D.S Embankment SS 2

Weir Data
Weir Crest Shape
☐ Broad Crested
☒ Ogee
 Spillway Approach Height: 19.7
 Design Energy Head: 5.8 Cd ...

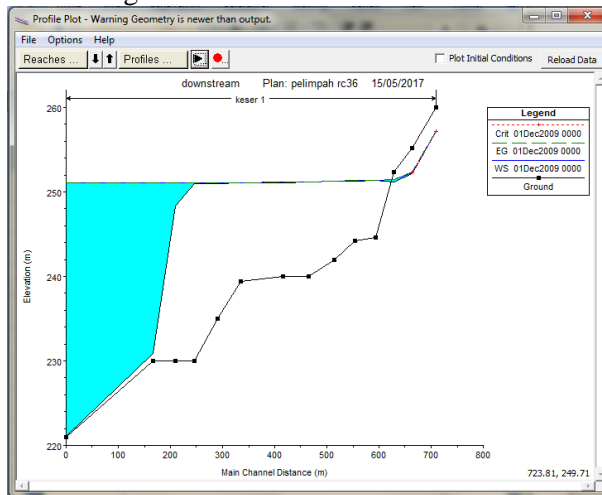
OK Cancel

Enter station and elevation of the top of the weir embankment.

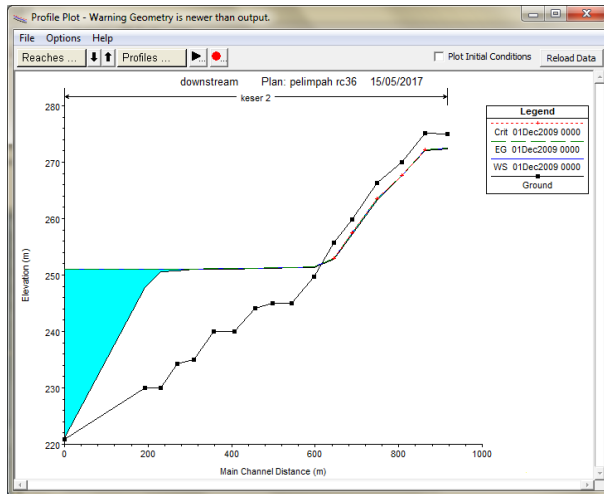
Gambar 4. 46 Penambahan pelimpah pada tubuh bendungan

Gambar 4. 47 Pelimpah pada kotak editor *Inline Structure Data*

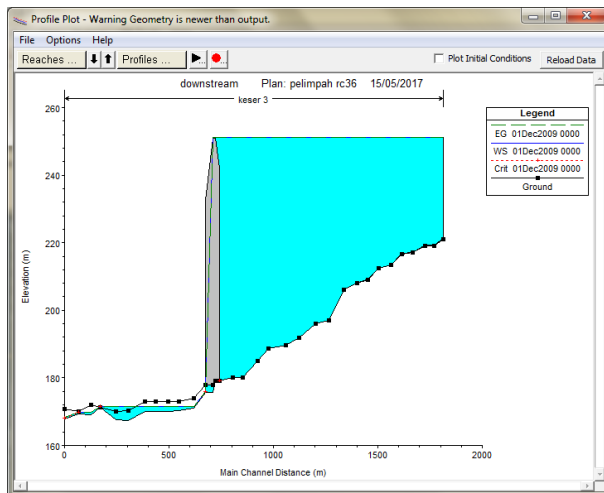
Output potongan memanjang dari model kedua yang dilakukan dengan *running* data selama 34 tahun pada daerah *upstream* (*reach 1* dan *reach 2*) ditunjukkan oleh gambar 4.48 dan gambar 4.49, sedangkan untuk daerah *downstream* ditunjukkan oleh gambar 4.50.



Gambar 4. 48Profile Plot Reach 1 pada Tahun ke 34 Setelah Penambahan Pelimpah



Gambar 4. 49Profile Plot Reach2 pada Tahun ke 34 Setelah Penambahan Pelimpah

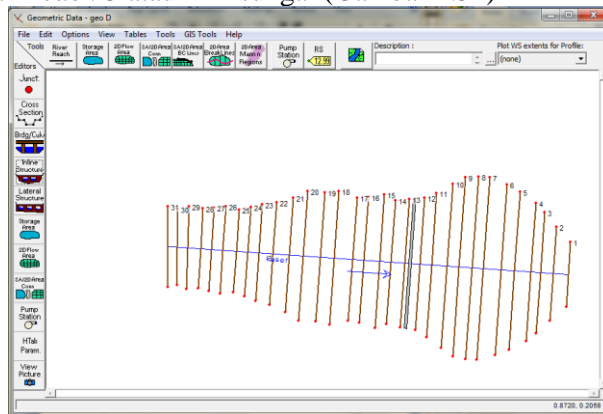


Gambar 4. 50Profile Plot Reach 3 pada Tahun ke 34 Setelah Penambahan Pelimpah

Pada pemodelan ini dimodelkan pelimpah dengan tujuan agar kecepatan di bagian hulu tersebut tidak bernilai nol, namun ternyata output yang terjadi masih sama dengan pemodelan pertama dimana tidak ada *sedimentasi* di *reach* hilir.

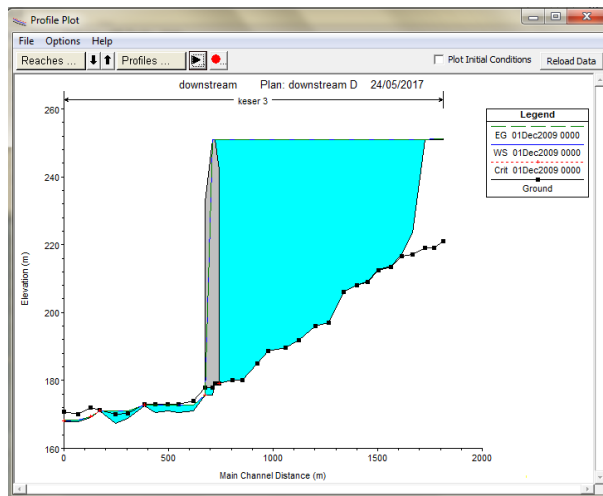
4.1.8. Pemodelan Ketiga

Pemodelan ketiga dilakukan dengan hanya memodelkan geometri *reach* 3 atau hilir sungai (Gambar 4.51)



Gambar 4. 51 Geometri pada Pemodelan Ketiga

Output potongan memanjang dari model ketiga yang dilakukan dengan *running* data selama 34 tahun adalah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.52 berikut

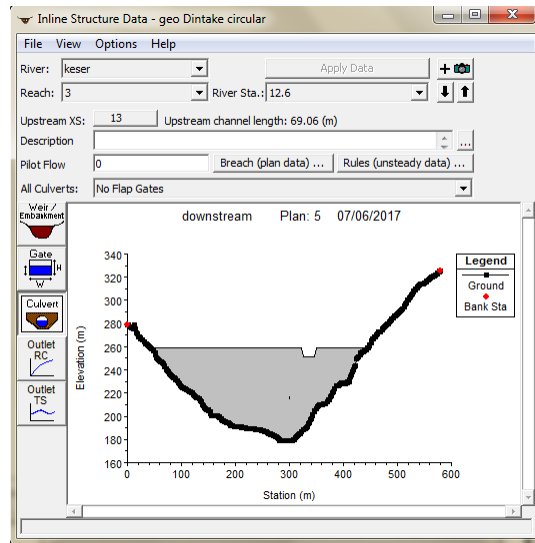


Gambar 4. 52Profile Plot tahun ke 34dari Pemodelan Ketiga

Pemodelan ketiga dimodelkan dengan *reach* hilir saja, hal ini dengan maksud bahwa tidaknya adanya pada pemodelan sebelumnya dikarenakan percabangan yang ada. Hasil pemodelan ini tampak sedimen namun sangat kecil dan hanya pada bagian hulu, sedangkan pada bagian hilir yang dekat dengan bendungan tidak ada *sedimentasi*.

4.1.9. Pemodelan Keempat

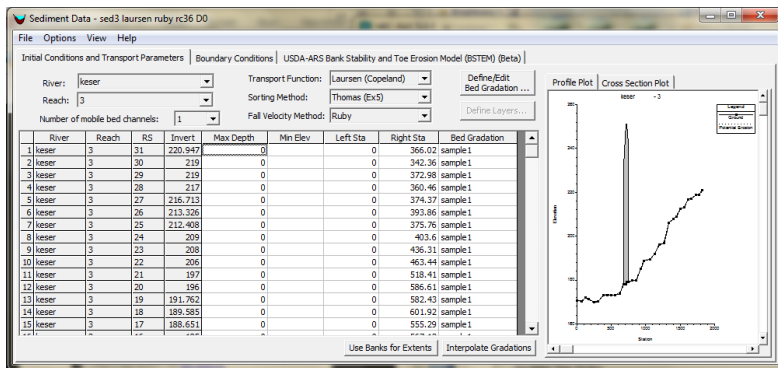
Pemodelan keempat dimodelkan dengan penambahan saluran pengambilan berbentuk lingkaran dengan diameter 1 meter pada *station* bendungan. Penambahan saluran pengambilan ini dimodelkan dengan *input culvert*, dengan cara memilih menu *culvert* pada kotak editor *Inline Structure Data* (Gambar 4.53). Kemudian akan muncul kotak *Culvert Data Editor*, pilih bentuk *culvert* pada pilihan *Shape/Circular* dan isi diameter sebesar 1 meter. Elevasi hulu saluran pengambilan sesuai dengan data konsultan perencana yaitu +215,50 (Gambar 4.54). Pada *Sediment Data* juga dilakukan perubahan pada *Max Depth* menjadi 0 m (Gambar 4.55), karena model ini merupakan model sedimentasi.



Gambar 4. 53 Menu *Culvert* pada Kotak *Inline Structure Data*

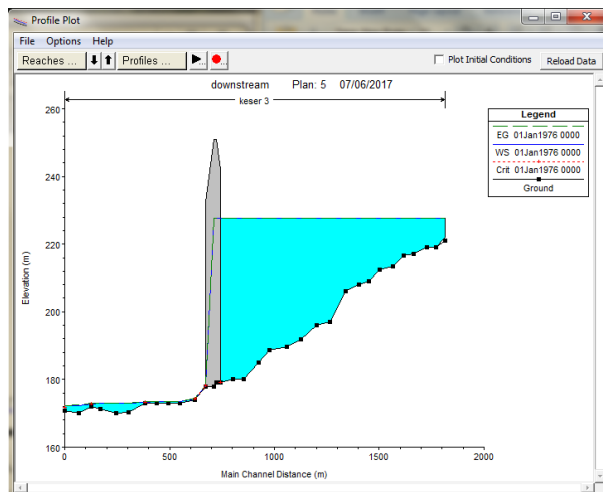
Centerline Stations		
	Upstream	Downstream
1	300.	300.
2		
3		
4		

Gambar 4. 54 Kotak *Culvert Data Editor*

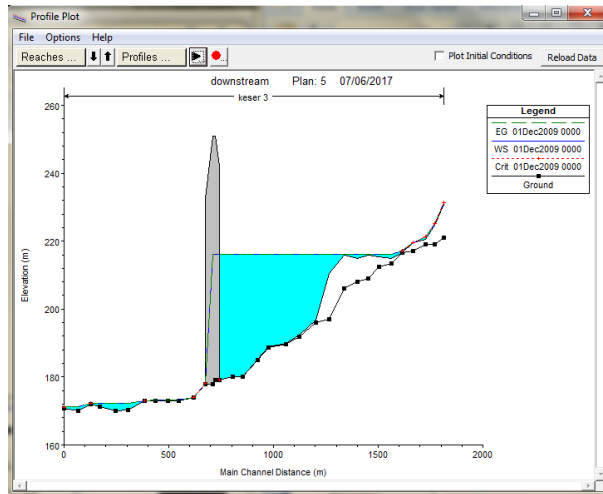


Gambar 4. 55Max Depth=0 pada Kotak Editor Sediment Data

Output potongan memanjang dari model keempat yang dilakukan dengan *running* data selama 34 tahun. Hasil simulasi pada tahun pertama dan tahun ke-34 adalah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.56 dan gambar 4.57 berikut.



Gambar 4. 56Profile Plot Tahun ke-1 dari Pemodelan Keempat

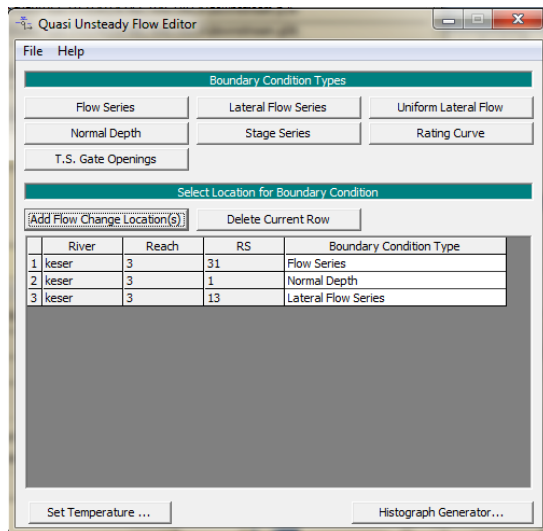


Gambar 4. 57 *Profile Plot* Tahun ke-34 dari Pemodelan Keempat

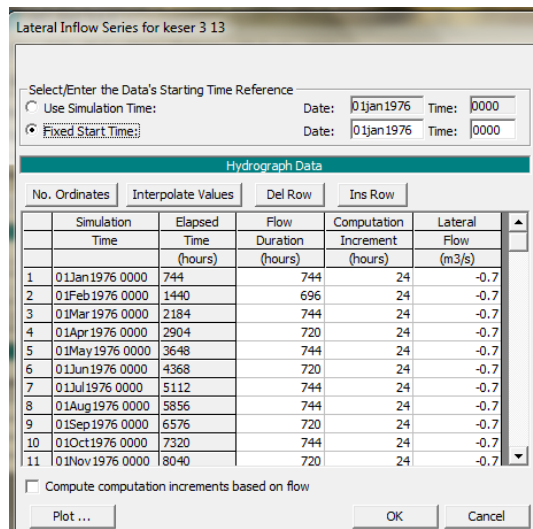
Pada pemodelan ini *input culvert* dimaksudkan agar ada kecepatan pada daerah hilir sehingga terjadi *sedimentasi* hingga bagian hilir. *Output* dari pemodelan ini tampak *sedimentasi* lebih ke hilir pada bagian sebelumnya namun pada *running* waktu pertama air waduk turun, sedangkan pada prinsipnya air waduk diisi dulu hingga penuh lalu kemudian dioperasikan

4.1.10. Pemodelan Kelima

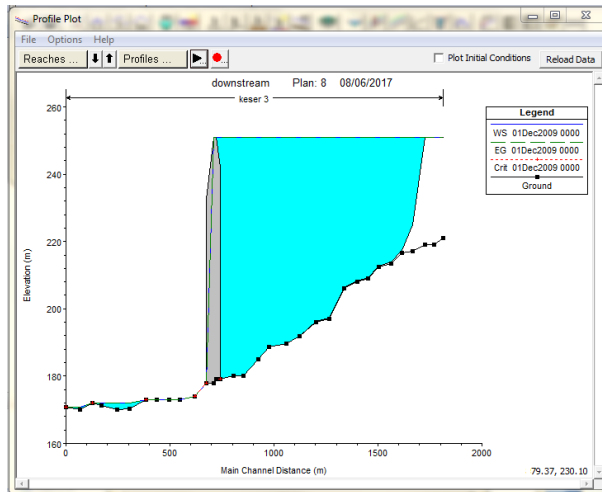
Pemodelan kelima dengan memasukkan debit lateral pada *River Station* hulu bendungan yaitu *River Station* 13 (Gambar 4.58). Besar debit lateral yaitu besar debit pengambilan namun dengan tanda negatif, sebagai penanda pengganti saluran pengambilan yaitu $-0,7 \text{ m}^3/\text{dt}$ (Gambar 4.59). Sedangkan saluran pengambilan yang dimodelkan dengan *circular culvert* pada pemodelan sebelumnya tidak digunakan dalam pemodelan kelima ini. *Output* potongan memanjang dari model kelima yang dilakukan dengan *running* data selama 34 tahun adalah sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 4.60.



Gambar 4. 58 Input Lateral Flow Series pada RS 13



Gambar 4. 59 Kotak Editor Lateral Inflow Series

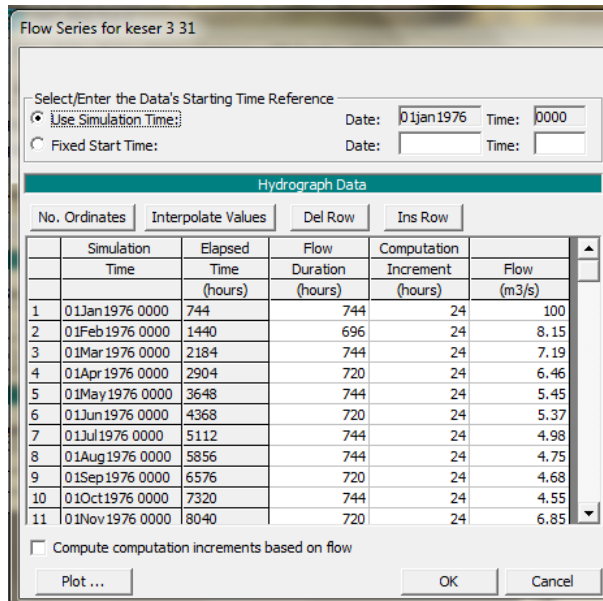


Gambar 4. 60 *Profile Plot* Tahun ke-34 dari Pemodelan Kelima

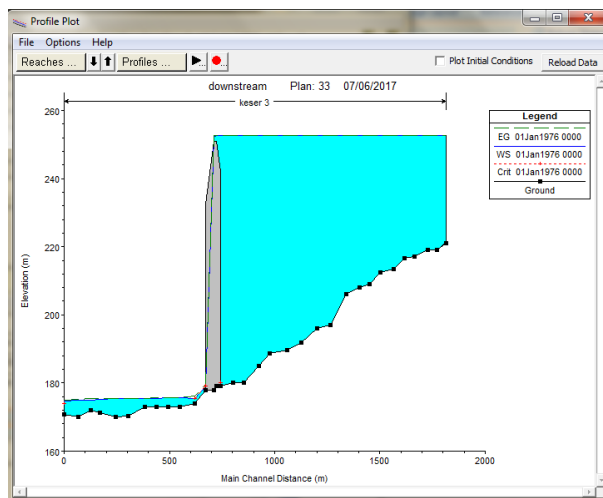
Pemodelan ini dilakukan sebagai alternatif lain dari pemodelan keempat agar kecepatan pada bagian hilir tidak bernilai nol. Namun sebagaimana terlihat, *sedimentasi* yang terjadi tetap hanya pada bagian hulu saja.

4.1.11. Pemodelan Keenam

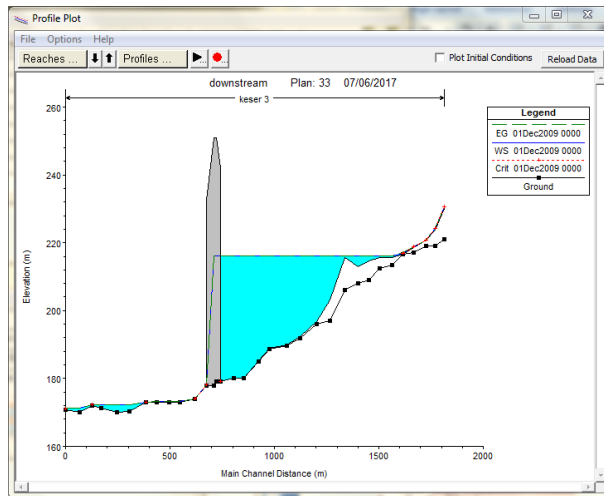
Pemodelan keenam dilakukan dengan memodelkan saluran pengambilan sebagaimana pemodelan keempat, namun yang membedakan adalah pada data *flow series* debit pertama diperbesar hingga 100 m³/detik (Gambar 4.61) Hal ini dilakukan dengan asumsi air waduk diisi terlebih dahulu sampai penuh baru dioperasikan. Sehingga model pada profil pertama berupa waduk yang penuh airnya. *Output* potongan memanjang dari model keempat yang dilakukan dengan *running* data selama 34 tahu. Hasil simulasi pada tahun pertama dan tahun ke-34 adalah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.62 dan gambar 4.63



Gambar 4. 61 Debit *Inflow* Pertama Diperbesar 100m³/Detik



Gambar 4. 62 *Profile Plot* Tahun ke-1 dari Pemodelan Keenam



Gambar 4. 63 *Profile Plot* Tahun ke-34 dari Pemodelan Keenam

Pemodelan keenam di menghasilkan output yang tidak berbeda jauh dari pemodelan keempat, dimana *sedimentasi* terjadi hingga hampir di hulu bendungan

4.2 Perhitungan Analitik

Angkutan sedimen total pada tugas ini dihitung menggunakan persamaan Laursen sebagaimana yang sudah dijelaskan sebelumnya, bahwa rumus ini dipilih karena data dari variabel yang dibutuhkan tersedia dan ukuran diameter sedimen sesuai dengan persamaan ini dimana untuk ukuran partikel jenis pasir hingga lanau. Konsentrasi sedimen dengan metode Laursen dihitung dengan persamaan berikut:

$$C_t = 0.01 \gamma \sum_i p_i \left(\frac{d_i}{D} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{ci}} - 1 \right) f \left(\frac{U_*}{\omega_i} \right)$$

persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi

$$C_t = 0.01 \gamma \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{ci}} - 1 \right) f \left(\frac{U_*}{\omega_i} \right)$$

dimana γ = berat jenis air

d_i = ukuran partikel sedimen berpresentase $i\%$

D = kedalaman rata-rata

τ' = tegangan geser

τ_{ci} = tegangan geser kritis

U_* = kecepatan geser

ω_i = kecepatan jatuh partikel sedimen ukuran i

Tegangan geser dihitung dengan persamaan

$$\tau' = \frac{\rho V^2}{58} \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^{1/3}$$

dimana τ' = tegangan geser

ρ = berat jenis air

V = kecepatan aliran

d_{50} = ukuran partikel sedimen berpresentase 50%

D = kedalaman rata-rata

τ_c diperoleh dari diagram Shield (Gambar 4.65) dimana angka Reynold dihitung dari persamaan berikut

$$Re = \frac{(g \cdot D \cdot S)^{1/2} \cdot d_{50}}{v} = \frac{U_* \cdot d_{50}}{v}$$

$$\tau_c = \tau * (\gamma_s - \gamma) \cdot d_{50}$$

Sedangkan parameter $f\left(\frac{U_*}{\omega_i}\right)$ diperoleh dari gambar 4.66

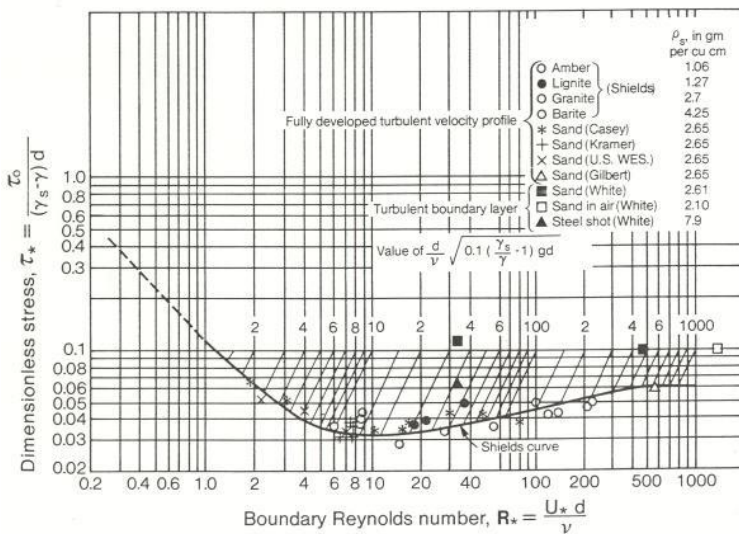
$$U_* = g \cdot D \cdot S^{1/2}$$

ω_i diperoleh dari grafik hubungan diameter sedimen, *shape factor*, dan suhu yang bisa dilihat dari Gambar 4.67

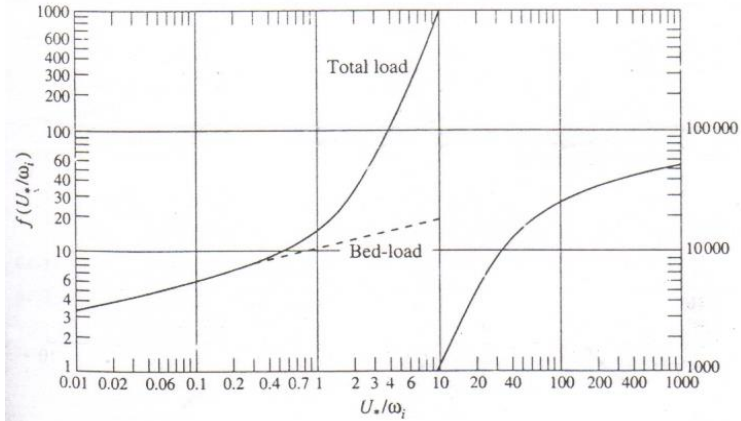
Maka debit sedimen per satuan lebar sungai adalah sebagai berikut

$$q_t = q \cdot C_t$$

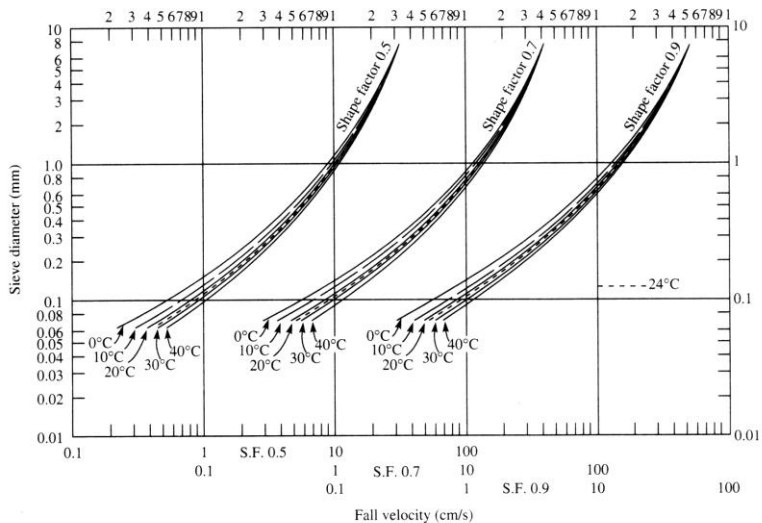
dimana q = debit aliran persatuan lebar
 q_t = debit sedimen persatuan lebar



Gambar 4. 64 Shield Diagram (Vanoni,1975)



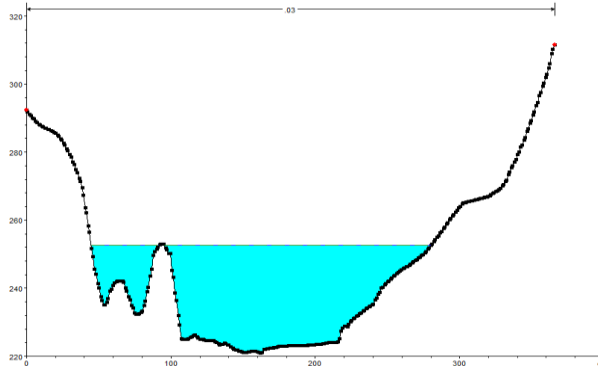
Gambar 4. 65 Fungsi $f(U_*/\omega_i)$ berdasarkan Laursen (Laursen, 1958)



Gambar 4. 66 Hubungan ukuran diameter dan kecepatan jatuh (US Inter-Agency Committee on Water Resources, Subcommittee on Sedimentation, 1957)

Contoh perhitungan untuk tahun 1976, dan perhitungan hanya dilakukan pada *cross section* hulu (RS 31) karena keterbatasan data debit.

Diketahui dari geometri sebagaimana gambar 4.67 berikut:



Gambar 4. 67 *Cross section* RS 31

Dengan penyederhanaan geometri sungai diasumsikan berbentuk trapesium dengan data sebagai berikut

Lebar sungai $B = 145 \text{ m} = 475,722 \text{ ft}$

Kemiringan tebing sungai $m = 1$

Data lain dari Sungai Keser adalah sebagai berikut:

Ukuran partikel median $= d_{50} = 0.181 \text{ mm} = 1,81 \times 10^{-4} \text{ m} = 5,94 \text{ ft}$

Kemiringan $= S = 0,00325$

Rapat masa air $= \rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3 = 62,428 \text{ lb/ft}^3$

Rapat masa sedimen $= \rho_s = 2731 \text{ kg/m}^3 = 170,491 \text{ lb/ft}^3$

Temperatur $= T = 25 \text{ C}$

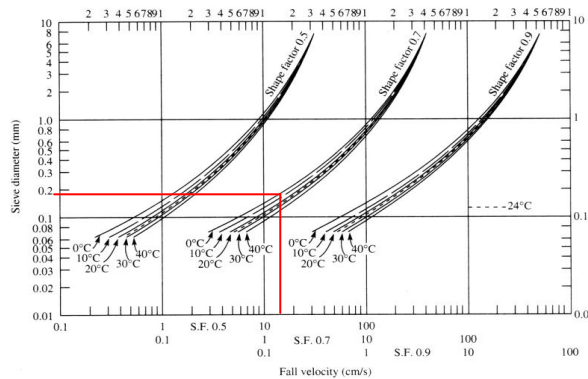
Viskositas kinematis $= \nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{detik} = 1,08 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{dt}$

Percepatan gravitasi $= g = 9,81 \text{ m/detik}^2 = 32,185 \text{ ft/dt}$

Debit $= Q = 71.65 \text{ m}^3/\text{dt} = 2530,296$

Hal yang perlu diperhatikan adalah dalam perhitungan analitik ini menggunakan satuan *US Customary*.

Kecepatan jatuh diperoleh dari grafik hubungan diameter butiran dengan kecepatan jatuh. Untuk diameter 0,181 mm, suhu air 25C, dan *shape factor* diasumsikan 0,7 karena pasir alami makadiperoleh kecepatan jatuh= $\omega = 27 \text{ cm/s} = 0,27 \text{ m/s} = 0,886 \text{ ft/s}$ sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 4. 68 berikut



Gambar 4. 68 Mencari Kecepatan Jatuh

Kedalaman rata-rata penampang diperoleh dari *trial and error* sehingga diperoleh nilai koefisien Manning sesuai dengan data yaitu 0,03. Koefisien Manning tersebut dihitung dengan persamaan

$$n = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{V}$$

dimana

$$R = \frac{A}{P} = \frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{m^2 + 1}}$$

dicoba nilai kedalaman rata-rata=D=h= 0.571 m= 1,874 ft

Luas penampang basah $A = (b + mh)h$
 $= (475,722 + 1 \times 1,874) \times 1,874 = 894,878 \text{ ft}^2$

Keliling basah $P = b + 2h\sqrt{m^2 + 1}$
 $= 475,722 + 2 \times 1,874\sqrt{1^2 + 1} = 481,021 \text{ ft}$

$$\text{Jari-jari hidrolis, } R = \frac{A}{P} = \frac{894,878}{481,021} = 1,86 \text{ ft}$$

Nilai R yang mendekati nilai h menunjukkan bahwa saluran tergolong saluran lebar sekali (*wide channel*) yang jika lebar sungai 5 hingga 10 kali kedalaman airnya maka besar jari-jari hidrolisnya sama dengan kedalaman alirannya.

$$\text{Kecepatan rata-rata, } V = \frac{Q}{A} = \frac{2530,296}{894,878} = 2,828 \text{ ft/s}$$

$$\text{Koefisien Manning } n = \frac{1,86^{2/3} \times 0,00325^{1/2}}{2,828} = 0.03 \text{ (OK)}$$

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan geser } U_* &= \sqrt{g \cdot D \cdot S} \\ &= \sqrt{32,185 \times 1,874 \times 0,00325} = 0,443 \text{ ft/s} \end{aligned}$$

Angka Reynold

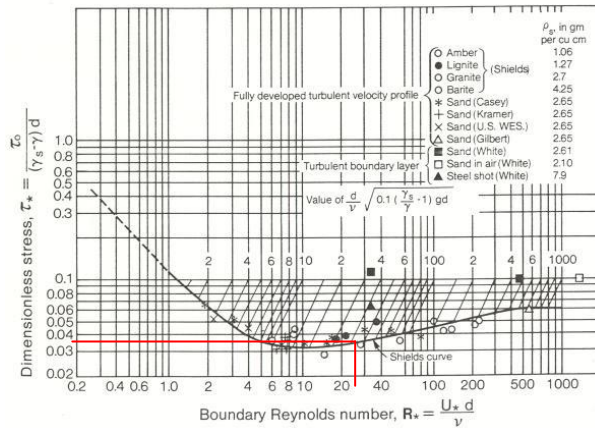
$$Re = \frac{U_* \cdot d_{50}}{\nu} = \frac{0,443 \times 5,94 \times 10^{-4}}{1,08 \times 10^{-5}} = 24.424$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan geser } \tau' &= \frac{\rho V^2}{58} \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^{1/3} \\ &= \frac{62,428 \times 2,828^2}{58} \left(\frac{5,94 \times 10^{-4}}{1,874} \right)^{1/3} = 0,587 \text{ lb/ft}^2. \end{aligned}$$

Tegangan geser kritis diperoleh dari diagram Shield dengan berdasarkan pada besar angka Reynold. Dari grafik tersebut terlebih dahulu didapatkan nilai *dimensionless shear stress* (τ_*), sehingga tegangan geser kritis dapat dihitung.

Untuk $Re = 24.424$ diperoleh besar $\tau_* = 0.035$ (Gambar 4.69), maka tegangan geser kritis

$$\begin{aligned} \tau_c &= \tau_* (\gamma_s - \gamma) \cdot d_{50} \\ &= 0,035(170,491 - 62,428) \cdot 5,94 \cdot 10^{-4} = 0,00225 \text{ lb/ft}^2. \end{aligned}$$

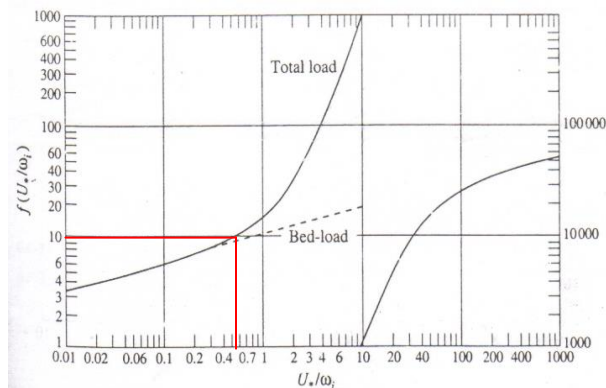


Gambar 4. 69 Mencari Tegangan Geser Kritis

Parameter $f\left(\frac{U_*}{\omega_i}\right)$ diperoleh dari grafik hubungandengan $\frac{U_*}{\omega_i}$.

dimana $\frac{U_*}{\omega_i} = \frac{0,443}{0,886} = 0.499$

Maka dari gambar 4.70 diperoleh $f\left(\frac{U_*}{\omega_i}\right) = 10$

Gambar 4. 70 Mencari nilai $f(U_*/\omega_i)$ pada Tahun 1976

Konsentrasi sedimen

$$C_t = 0.01 \gamma \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{ci}} - 1 \right) f \left(\frac{U_*}{\omega_i} \right)$$

$$C_t = 0,01 \times 61,428 \left(\frac{5,94 \times 10^{-4}}{1,478} \right)^{7/6} \times \left(\frac{0,587}{0,00225} - 1 \right) \times 10$$

$$= 0,138 \text{ lb/ft}^3$$

$$C_t = 0,138 \times 16,018 = 2,217 \text{ kg/m}^3 = 2217 \text{ ppm}$$

Debit per satuan lebar penampang

$$q = \frac{Q}{B} = \frac{71,65}{145} = 0,494 \text{ m}^3/\text{s/m}$$

Debit muatan sedimen per satuan lebar penampang

$$qt = q \times C_t = 0,494 \times 2,217 = 1,096 \text{ kg/s /m}$$

Debit muatan sedimen

$$Qt = qt \times B = 1,096 \times 145 = 158,85 \text{ kg/s}$$

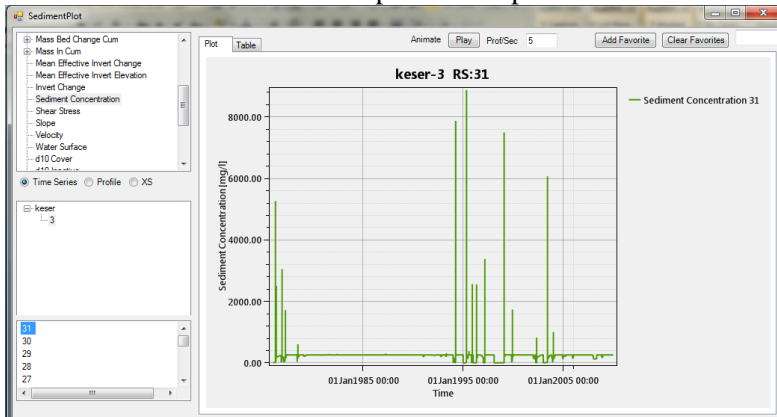
Sedangkan perhitungan lengkap yang dilakukan setiap tahun yang lain dilakukan dengan cara yang sama. Perhitungan tersebut dapat dilihat pada Lampiran Tabel 9. Hasil Perhitungan Analitik Konsentrasi Sedimen. Hasil perhitungan analitik ini berupa konsentrasi sedimen dan debit muatan sedimen, yang dapat dilihat pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4. 4 Konsentrasi dan Debit Angkutan Sedimen

Tahun	Konsentrasi Sedimen (Ct)			qs	Qs
	lb/ft3	kg/m3	ppm (mg/l)	(kg/s)/m	kg/s
1976	0.138	2.217	2217.022	1.096	158.850
1977	0.147	2.355	2355.450	0.865	125.381
1978	0.148	2.370	2370.238	0.815	118.133
1979	0.150	2.410	2410.212	0.688	99.710
1980	0.145	2.328	2327.523	0.303	43.944
1981	0.141	2.260	2260.466	0.437	63.429
1982	0.142	2.276	2275.884	0.396	57.352
1983	0.140	2.249	2248.860	0.453	65.622
1984	0.144	2.314	2313.724	0.348	50.532
1985	0.151	2.417	2416.710	0.230	33.399
1986	0.150	2.397	2397.431	0.241	34.967
1987	0.147	2.355	2355.418	0.270	39.123
1988	0.146	2.334	2333.972	0.321	46.539
1989	0.140	2.249	2249.413	0.462	66.988
1990	0.142	2.276	2275.884	0.396	57.352
1991	0.140	2.247	2247.111	0.447	64.852
1992	0.152	2.439	2439.280	0.645	93.473
1993	0.143	2.283	2283.282	0.370	53.589
1994	0.153	2.458	2457.714	0.593	85.995
1995	0.149	2.386	2386.042	1.877	272.224
1996	0.148	2.373	2372.797	1.886	273.536
1997	0.139	2.234	2233.669	0.825	119.613
1998	0.162	2.590	2589.607	4.508	653.669
1999	0.149	2.390	2390.024	0.639	92.645
2000	0.140	2.243	2243.221	0.477	69.114
2001	0.141	2.251	2250.951	0.451	65.413
2002	0.143	2.287	2286.632	1.087	157.618
2003	0.159	2.551	2551.267	2.379	344.982
2004	0.139	2.225	2225.370	0.457	66.205
2005	0.137	2.199	2198.775	0.396	57.432
2006	0.143	2.289	2289.453	0.384	55.702
2007	0.141	2.265	2264.773	0.420	60.877
2008	0.145	2.325	2325.257	0.955	138.539
2009	0.145	2.324	2324.074	0.323	46.784

4.3 Perbandingan Pemodelan HEC-RAS dengan Perhitungan Analitik

Perbandingan yang dilakukan adalah perhitungan analitik dengan hasil pemodelan keempat pada daerah hulu (RS 31). Dari pemodelan HEC-RAS dapat ditampilkan besar konsentrasi sedimen dengan cara memilih menu *View/ Sediment Output* maka akan muncul kotak *Sediment Plot* sebagaimana gambar 4.71 berikut. Selanjutnya pilih *Sediment Concentration*, Keser 3 sebagai *reach* sungai dan “31” sebagai *River Station* pada sisi kiri kotak *Sediment Plot*. Pada sisi kanan muncul *Plot* grafik konsentrasi sedimen, sedangkan untuk menampilkan nilai *sedimentasi* dalam bentuk tabel pilih *Table* pada sisi atas kotak



Gambar 4. 71 Kotak *Sediment Plot*

HEC-RAS menghitung *transport sediment* sesuai dengan *computed increment* yang kita masukkan pada *Flow Series Data*, dimana dalam tugas akhir ini dihitung setiap harinya. Untuk perbandingan dengan angkutan sedimen hasil dari perhitungan analitik dilakukan dalam rentang waktu satu tahun. Angkutan sedimen diperoleh dengan mengonversikan debit angkutan sedimen ke dalam satuan berat, yang dihitung dengan cara sebagai berikut

Angkutan sedimen = $qs \times 365 \times 24 \times 3600/1000$ ton

Contoh untuk tahun 1976 perhitungan analitik, diketahui $qt=1,096$ kg/ detik maka besar angkutan sedimen

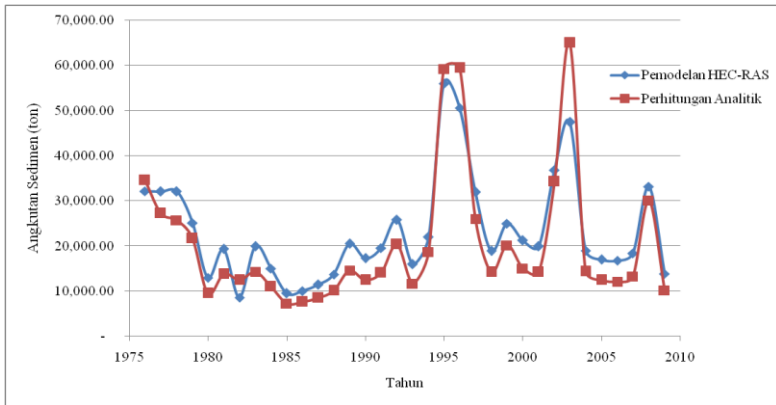
Angkutan sedimen = $1,096 \times 365 \times 24 \times 3600/1000$ ton
= 32.155,11 ton

Perhitungan besar angkutan sedimen untuk setiap tahun yang lain dapat dilihat pada Lampiran Tabel 10. Berikut ini adalah tabel nilai angkutan sedimen dari pemodelan HEC-RAS dan hasil perhitungan analitik (Tabel 4.5)

Tabel 4. 5 Perbandingan Angkutan Sedimen dalam ton

Tahun	Pemodelan HEC-RAS	Perhitungan Analitik	Tahun	Pemodelan HEC-RAS	Perhitungan Analitik
1976	32,155.11	34,548.14	1993	15,984.83	11,654.97
1977	32,072.08	27,268.98	1994	21,951.97	18,703.11
1978	32,122.00	25,692.63	1995	56,023.15	59,205.80
1979	25,131.88	21,686.00	1996	50,575.14	59,491.25
1980	12,987.67	9,557.29	1997	31,926.42	26,014.58
1981	19,329.06	13,795.08	1998	18,923.52	14,216.15
1982	8,593.45	12,473.53	1999	24,980.11	20,149.22
1983	19,932.01	14,272.05	2000	21,234.18	15,031.50
1984	15,036.31	10,990.13	2001	19,929.14	14,226.57
1985	9,501.15	7,263.92	2002	36,849.29	34,280.19
1986	10,036.71	7,604.86	2003	47,413.37	65,030.10
1987	11,416.59	8,508.96	2004	18,995.40	14,398.85
1988	13,707.39	10,121.84	2005	16,973.48	12,490.87
1989	20,503.68	14,569.09	2006	16,753.80	12,114.69
1990	17,269.35	12,473.53	2007	18,407.37	13,240.14
1991	19,567.64	14,104.56	2008	33,162.06	30,130.76
1992	25,821.65	20,329.45	2009	13,847.10	10,174.95

Untuk memudahkan perbandingan dibuat grafik hubungan tahun dengan besar angkutan sedimen pada gambar 4.72 berikut



Gambar 4. 72 Grafik Perbandingan Angkutan Sedimen per Tahun

Dari hasil angkutan sedimen tersebut dapat dirata-rata untuk mendapatkan besar laju sedimentasi. Maka besar laju sedimentasi pada waduk Tugu dengan menggunakan metode pemodelan HEC-RAS diperoleh 23.209,24 ton/tahun, sedangkan dengan metode perhitungan analitik diperoleh laju sedimentasi sebesar 20.465,11 ton/tahun. Besar laju sedimentasi ini dapat juga dinyatakan dalam satuan yang lain, antara lain m^3/th , mm/th , dan $\text{mm}/\text{th}/\text{km}^2$.

Laju sedimentasi (m^3/th) = Laju sedimentasi (ton/th) / berat jenis sedimen (ton/m^3), dimana diketahui berat jenis sedimen = $1,055 \text{ ton}/\text{m}^3$, sehingga diperoleh untuk metode pemodelan HEC-RAS, laju sedimentasi = $23.209,24 / 1,055 = 21.999,28 \text{ m}^3/\text{th}$ sedangkan untuk metode perhitungan analitik laju sedimentasi = $20.465,11 / 1,055 = 19.398,21 \text{ m}^3/\text{th}$.

Laju sedimentasi tersebut jika dihitung dalam satuan harian maka diperoleh untuk metode pemodelan HEC-RAS, laju sedimentasi = $21.999,28 / 365 = 60,27 \text{ m}^3/\text{hari}$ sedangkan untuk metode perhitungan analitik, laju sedimentasi = $19.398,21 / 365 = 53,15 \text{ m}^3/\text{hari}$

Dari grafik 4.72 diatas, dan hasil laju sedimentasi terlihat bahwa besar angkutan sedimen hasil perhitungan analitik cenderung lebih kecil dibanding hasil pemodelan dengan HEC-RAS. Perbedaan yang terjadi pada hasil kedua metode ini dikarenakan pada perhitungan analitik ada penyederhanaan geometri seperti bentuk *cross section* sungai, lebar penampang melintang, kemiringan tebing sungai, dan kemiringan sungai, serta asumsi lain. Sedangkan pada pemodelan menggunakan *software* HEC-RAS geometri sungai lebih detail, meskipun begitu pemodelan yang dilakukan masih berupa satu dimensi (kecepatan aliran di suatu penampang melintang merupakan kecepatan rata-rata, sedangkan kenyataannya dalam satu penampang kecepatan aliran berbeda di tiap titiknya) sehingga masih memiliki keterbatasan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

1. Berikut merupakan pemodelan yang dilakukan untuk angkutan sedimen pada Bendungan Tugu menggunakan model HEC-RAS antara lain:
 - a. Pemodelan pertama, memodelkan geometri sungai dengan tiga *reach* di daerah genangan sebagai *river station* dan bendungan pada *inline structure* dengan hasil sedimentasi hanya terjadi di *reach* hulu.
 - b. Pemodelan kedua, memodelkan sama sebagaimana model pertama namun dengan penambahan pelimpah pada *inline structure*, yang kemudian hasil sedimen tetap terjadi di hulu saja meski sedimentasi yang terjadi lebih besar dan lebih ke hulu.
 - c. Pemodelan ketiga, memodelkan sebagaimana model kedua, namun dua *reach* daerah hulu dihapus sehingga hanya ada satu *reach* hilir. Output sedimentasi pada model ini hanya pada bagian hulu tampungan dan kecil nilainya.
 - d. Pemodelan keempat, dilakukan sama dengan pemodelan ketiga dengan penambahan *culvert* pada *inline structure* sebagai saluran pengambilan dan perubahan *max depth* menjadi 0 m pada *sediment data* karena merupakan model sedimentasi. Hasil model ini adalah sedimentasi yang terjadi berjalan hampir sampai ke bagian hilir namun muka air turun setinggi elevasi *culvert* dari waktu pertama dikarenakan besar outflow yang lebih dominan.

- e. Pemodelan kelima, merupakan alternatif lain dari model keempat. Model ini sama dengan model ketiga namun pada *cross section* hulu bendungan dimasukkan *lateral flow series* dimana debitnya merupakan debit pengambilan yang bertanda negatif. Output yang dihasilkan hampir sama dengan pemodelan ketiga, dimana sedimentasi kecil pada bagian hulu.
 - f. Pemodelan kelima merupakan lanjutan dari pemodelan keempat, namun besar debit awal dibesarkan dengan asumsi bahwa waduk diisi terlebih dahulu hingga penuh baru dioperasikan. Hasil pemodelan ini tidak berbeda jauh dengan pemodelan keempat namun muka air waduk tidak turun di awal.
2. Perhitungan analitik dihitung menggunakan metode *total load* Laursen yang sama digunakan dalam pemodelan HEC-RAS. Perhitungan analitik dilakukan pada *river station* hulu. Hasil dari perhitungan analitik adalah konsentrasi sedimen dan debit angkutan sedimen, sedangkan yang dibandingkan dengan pemodelan HEC-RAS adalah besar angkutan sedimen. Besar angkutan sedimen hasil perhitungan analitik cenderung lebih kecil dibanding pemodelan HEC-RAS, dimana perkiraan besar laju sedimentasi dari metode pemodelan HEC-RAS sebesar 22.000 m³/th sedangkan laju sedimentasi hasil perhitungan analitik sebesar 19.400 m³/th. Perbedaan hasil ini dikarenakan pada perhitungan analitik terdapat penyederhanaan geometri seperti penampang melintang, kemiringan tebing sungai, kemiringan sungai, dan lain sebagainya. Sedangkan pada HEC RAS meski geometri sungai lebih detail, pemodelan masih berupa satu dimensi.

3. Keterbatasan pemodelan angkutan sedimen menggunakan HEC-RAS antara lain:
 - a. Pemodelan ini merupakan analisis satu dimensi, yang artinya kecepatan aliran di satu penampang melintang merupakan kecepatan rata-rata, sedangkan kenyataannya dalam satu penampang melintang kecepatan aliran dapat berbeda-beda. Hal ini menyebabkan sedimentasi yang menggambarkan tidak sesuai dengan teori yang ada.
 - b. Diperlukannya data yang lebih lengkap dibanding jika menghitung secara analitik seperti data suhu air, data geometri, dan data hubungan debit dengan konsentrasi sedimen.

Kelebihan pemodelan angkutan sedimen menggunakan HEC-RAS antara lain:

- a. Memiliki tingkat akurasi yang baik terutama dari segi geometri sungai.
- b. Besar sedimentasi setiap waktunya dapat dilihat dengan jelas baik berupa gambar, grafik maupun tabel besarnya sedimentasi.
- c. Untuk menyimulasikan sedimentasi pada bendungan menggunakan *software* HEC-RAS, apabila terdapat alternatif desain maka dapat disimulasikan dengan cepat.

5.2 Saran

Dari kesimpulan diatas dapat diberikan beberapa saran terkait dengan prediksi laju sedimentasi pada Bendungan Tugu, diantaranya:

- a. Simulasi yang digunakan dengan HEC-RAS 5.03 merupakan pemodelan satu dimensi sehingga memiliki beberapa keterbatasan. Untuk hasil yang lebih maksimal pemodelan ini bisa dilanjutkan dengan *software* HEC-RAS maupun *software* lain yang menggunakan model 2 atau 3 dimensi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Anggrahini. 1997. *Hidrolika Saluran Terbuka*. CV.Citra Media. Surabaya
- Dep. PU Balai Besar Wilayah Sungai Brantas Surabaya. 2010. *Laporan Akhir Pekerjaan Proyek Pembangunan Bendungan Tugu*. KabupatenTrenggalek.
- Dep. PU Direktorat Sumber Daya Air. 2009. *Survey dan Monitoring Sedimentasi Waduk*. Jakarta
- Hydrologic Engineering Center.2016. *HEC-RAS River Analysis System, Application Guide, Version 5.0, February 2016*.U.S. Army Cormps of Engineers, Davis, CA.
- Hydrologic Engineering Center.2016. *HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Version 5.0, February 2016*. U.S. Army Cormps of Engineers, Davis, CA.
- Hydrologic Engineering Center.2016. *HEC-RAS River Analysis System, User's Manual, Version 5.0, February 2016*.U.S. Army Cormps of Engineers, Davis, CA.
- Ismawati, Sintya M. 2017. *Pemodelan Aliran 1D pada Bendungan Tugu Menggunakan Software HEC-RAS*. Surabaya
- Istiarto.2014. *Simulasi Aliran 1-Dimensi Dengan Bantuan Paket Program Hidrodinamika Hec-Ras.Junction and Inline Structures*. Yogyakarta.
- Istiarto.2014. *Simulasi Aliran 1-Dimensi Dengan Bantuan Paket Program Hidrodinamika Hec-Ras.Modul Pelatihan Simple Geometry River*.Yogyakarta.
- Yang,Chih Ted. 1996. *Sediment Transport Theory and Practice*. New York.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Lampiran Tabel 1. Data Cross Section Sungai RS 1-10

RS 1		RS 2		RS 3		RS 4		RS 5		RS 6		RS 7		RS 8		RS 9		RS 10	
Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation
0.00	197.05	0.00	210.05	0.00	233.14	0.00	252.05	0.00	260.61	0.00	266.21	0.00	269.82	0.00	271.08	0.00	276.77	0.00	277.04
3.43	196.38	4.97	207.47	6.39	229.74	7.30	248.54	8.39	255.03	9.02	258.03	9.67	265.63	9.69	264.60	9.48	276.75	8.69	272.06
6.85	195.60	9.93	204.90	12.79	226.34	14.61	245.18	16.78	249.66	18.04	252.38	19.34	261.05	19.38	259.80	18.96	269.13	17.37	264.81
11.99	194.75	17.38	201.49	22.38	221.38	25.56	239.11	29.37	243.14	31.56	244.83	33.85	254.03	33.91	256.64	33.17	256.52	30.40	253.33
15.41	194.36	22.35	200.12	28.77	218.08	32.86	234.79	37.76	237.35	40.58	238.58	43.52	250.15	43.59	254.51	42.65	249.47	39.08	250.00
20.55	193.87	29.80	198.80	38.36	213.13	43.81	228.57	50.35	238.58	54.11	230.30	58.03	232.22	58.13	250.74	56.87	238.55	52.11	240.73
32.54	192.71	47.18	195.93	60.74	202.04	69.37	212.42	79.72	232.81	85.67	232.54	91.88	218.44	92.03	233.12	90.04	217.41	82.50	208.80
37.67	192.19	54.63	194.78	70.33	199.31	80.33	205.17	92.30	226.53	99.19	231.71	106.38	210.74	106.56	227.70	104.26	211.73	95.53	205.00
41.10	191.83	59.60	194.41	76.72	197.90	87.63	201.63	100.69	221.42	108.21	229.34	116.06	215.00	116.25	225.47	113.74	208.56	104.22	204.31
46.24	191.32	67.05	193.73	86.31	196.00	98.58	198.50	113.28	211.38	121.74	223.08	130.56	209.07	130.78	220.45	127.96	205.00	117.24	200.00
54.80	190.38	79.46	192.28	102.29	192.83	116.84	195.31	134.26	201.24	144.28	207.10	154.74	202.56	155.00	213.75	151.65	200.25	138.95	202.29
58.22	190.00	84.43	191.66	108.68	191.63	124.14	194.41	142.65	199.61	153.30	203.97	164.41	201.41	164.69	211.01	161.13	200.00	147.64	205.69
66.79	189.40	96.84	189.97	124.67	188.53	142.40	192.60	163.63	196.90	175.84	201.55	188.59	198.15	188.91	202.14	184.83	211.34	169.35	205.56
71.92	188.97	104.29	189.14	134.26	186.72	153.35	190.16	176.21	196.30	189.37	200.46	203.10	198.95	203.44	200.61	199.04	202.44	182.38	188.84
80.49	188.08	116.71	188.05	150.24	182.82	171.61	186.31	197.19	195.00	211.91	196.90	227.28	197.86	227.66	193.96	222.74	188.00	204.09	187.38
89.05	187.46	129.13	187.15	166.22	180.87	189.86	180.26	218.17	191.16	234.46	185.05	251.45	187.60	251.88	185.58	246.44	185.87	225.80	186.86
97.61	186.93	141.54	186.47	182.21	181.27	208.12	178.63	239.14	186.31	257.00	180.97	275.63	182.65	276.10	183.94	270.13	183.49	247.51	183.29
106.17	186.56	153.96	186.00	198.19	181.79	226.37	178.19	260.12	179.02	279.55	179.81	299.81	179.72	300.32	181.84	293.83	182.00	269.22	183.00
114.73	186.14	166.37	185.89	214.17	181.68	244.63	177.58	281.10	177.80	302.09	178.00	323.99	178.55	324.54	183.00	317.52	182.56	290.93	182.19
118.16	185.98	171.34	185.59	220.56	181.39	251.93	177.22	289.49	176.66	311.11	178.00	333.66	177.78	334.22	183.00	327.00	182.49	299.62	181.86
126.72	185.66	183.76	184.86	236.55	178.90	270.19	174.84	310.47	175.22	333.65	173.59	357.84	173.00	358.44	173.04	350.70	175.98	321.33	180.37
131.86	185.47	191.21	184.51	246.14	175.30	281.14	172.84	323.06	171.36	347.18	170.34	372.35	175.01	372.97	173.00	364.92	173.00	334.36	173.21
140.42	185.14	203.62	181.91	262.12	171.96	299.40	177.23	344.03	173.97	369.72	174.64	396.52	177.22	397.19	181.00	388.61	173.00	356.07	173.00
148.98	184.64	216.04	177.94	278.10	183.55	317.65	184.25	365.01	184.94	392.27	176.25	420.70	178.00	421.41	179.46	412.31	180.06	377.78	180.25
152.41	184.38	221.00	176.03	284.50	184.31	324.96	184.83	373.40	186.04	401.28	176.68	430.37	178.31	431.10	179.12	421.79	180.80	386.47	187.43
157.55	183.99	228.45	174.10	294.09	184.92	335.91	185.70	385.99	186.16	414.81	177.65	444.88	178.91	445.63	180.46	436.00	188.87	399.49	197.63
160.97	183.85	233.42	172.83	300.48	185.40	343.21	186.36	394.38	186.36	423.83	178.30	454.55	179.91	455.32	185.66	445.48	187.83	408.18	201.93
166.11	183.64	240.87	170.95	310.07	186.07	354.17	187.34	406.97	186.50	437.35	179.04	469.06	194.75	469.85	195.89	459.70	179.88	421.20	209.98
174.67	183.30	253.28	175.65	326.05	187.06	372.42	188.93	427.94	186.79	459.90	179.66	493.24	204.19	494.07	205.44	483.39	196.60	442.92	209.84
183.23	181.67	265.70	184.05	342.03	187.46	390.68	190.48	448.92	187.39	482.44	181.75	517.42	205.06	518.29	209.90	507.09	207.87	464.63	210.19
195.22	177.62	283.08	184.72	364.41	189.36	416.24	193.74	478.29	186.44	514.00	183.49	551.26	199.41	552.20	214.36	540.26	210.35	495.02	213.80
200.36	176.47	290.53	185.05	374.00	190.48	427.19	195.00	490.88	186.81	527.53	184.00	565.77	198.39	566.73	215.15	554.48	213.55	508.05	216.50
208.92	176.00	302.95	186.36	389.98	192.48	445.45	195.00	511.85	186.36	550.07	187.25	589.95	198.42	590.95	216.28	578.18	220.52	529.76	223.40
217.48	174.63	315.36	187.61	405.97	194.51	463.70	194.94	532.83	186.00	572.62	190.45	614.13	198.64	615.17	218.33	601.87	229.96	551.47	232.30
229.47	170.75	332.75	189.19	428.34	195.00	489.26	191.01	562.20	189.16	604.18	194.40	647.98	206.81	649.07	220.23	635.05	237.84	581.87	243.94
238.03	176.10	345.16	190.52	444.33	195.00	507.52	189.62	583.18	190.12	626.72	200.17	672.16	209.24	673.29	222.95	658.74	239.40	603.58	251.53
246.59	181.89	357.58	192.39	460.31	194.74	525.77	189.87	604.16	192.63	649.27	205.86	696.33	216.17	697.51	227.22	682.44	235.00	625.29	259.98
255.16	184.21	369.99	194.26	476.29	191.86	544.03	190.32	625.13	196.44	671.81	207.78	720.51	222.67	721.73	229.07	706.14	240.45	647.00	262.66
268.86	184.76	389.86	195.00	501.86	190.00	573.24	190.52	658.70	204.45	707.88	209.60	759.20	224.12	760.48	232.77	744.05	244.49	681.74	255.00
277.42	185.03	402.28	195.00	517.85	190.00	591.50	192.97	679.67	206.54	730.42	212.32	783.38	225.62	784.70	236.33	767.74	245.34	703.45	258.01
280.84	185.27	407.24	195.00	524.24	190.00	598.80	194.54	688.07	207.05	739.44	214.15	793.05	226.33	794.39	238.42	777.22	244.61	712.14	257.86
292.26	185.93	423.80	195.00	545.55	190.00	623.14	199.37	716.04	211.71	769.50	222.13	825.29	237.46	826.68	241.10	808.82	254.54	741.09	259.88

Lampiran Tabel 2. Data Cross Section Sungai RS 11-20

RS 11		RS 12		RS 13		RS 14		RS 15		RS 16		RS 17		RS 18		RS 19		RS 20	
Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation
0.00	277.30	0.00	277.98	0.00	279.00	0.00	277.77	0.00	278.74	0.00	279.00	0.00	279.00	0.00	276.34	0.00	273.44	0.00	281.81
7.63	264.99	7.00	274.07	6.80	276.68	6.54	272.86	7.05	276.97	6.65	278.69	6.51	278.32	7.05	274.90	6.83	269.90	6.87	274.56
15.27	268.58	13.99	273.11	13.60	278.47	13.08	268.87	14.09	275.18	13.29	276.81	13.02	277.56	14.11	274.55	13.65	269.17	13.75	271.32
26.71	256.77	24.49	267.79	23.80	267.58	22.89	263.41	24.66	272.44	23.26	274.24	22.78	276.43	24.69	275.25	23.89	267.91	24.06	270.00
34.35	244.35	31.49	261.66	30.60	264.49	29.43	259.91	31.71	270.61	29.91	272.71	29.28	275.67	31.74	275.67	30.71	267.19	30.94	267.37
45.80	231.71	41.98	249.21	40.81	259.84	39.24	256.39	42.27	267.86	39.88	270.42	39.04	273.13	42.32	276.26	40.95	266.53	41.25	267.12
72.51	220.21	66.47	235.85	64.61	245.83	62.13	244.15	66.93	256.46	63.14	263.02	61.82	255.79	67.01	276.70	64.84	267.70	65.31	264.96
83.96	219.62	76.96	232.05	74.81	238.81	71.94	237.09	77.50	253.95	73.11	258.90	71.58	255.39	77.59	276.58	75.08	268.96	75.62	263.35
91.59	220.31	83.96	229.26	81.61	234.61	78.48	230.86	84.55	251.10	79.75	257.76	78.09	255.08	84.64	276.46	81.91	269.91	82.49	262.60
103.04	220.94	94.45	215.77	91.81	230.82	88.29	226.89	95.12	246.94	89.72	254.05	87.85	248.20	95.23	275.88	92.14	270.95	92.80	262.34
122.12	197.76	111.95	200.79	108.81	223.26	104.64	224.74	112.73	233.32	106.34	246.71	104.12	241.19	112.86	272.40	109.21	272.52	109.99	260.46
129.76	196.61	118.94	200.26	115.62	221.55	111.18	224.22	119.77	230.60	112.98	244.32	110.62	237.12	119.91	268.58	116.03	273.71	116.86	258.85
148.84	190.86	136.43	194.25	132.62	215.26	127.53	220.35	137.39	221.29	129.60	236.10	126.89	226.82	137.55	260.02	133.09	267.85	134.05	250.28
160.29	188.74	146.93	191.63	142.82	207.60	137.34	216.01	147.96	219.88	139.57	229.70	136.65	220.88	148.13	251.92	143.33	261.57	144.36	246.45
179.37	186.56	164.42	190.02	159.82	200.28	153.69	207.59	165.57	216.94	156.18	215.00	152.92	211.07	165.76	240.10	160.40	252.49	161.55	241.33
198.45	185.47	181.91	187.70	176.82	196.00	170.04	201.90	183.18	208.09	172.80	212.06	169.19	210.00	183.40	233.33	177.46	247.77	178.73	243.07
217.53	184.69	199.40	187.38	193.83	191.83	186.39	197.82	200.80	202.57	189.41	207.78	185.46	200.54	201.03	230.14	194.52	242.89	195.92	241.22
236.61	183.30	216.90	186.58	210.83	190.67	202.74	195.84	218.41	199.63	206.03	203.22	201.73	189.00	218.66	218.07	211.59	232.45	213.10	229.61
255.69	181.95	234.39	186.16	227.83	189.26	219.09	191.56	236.03	195.96	222.64	195.72	218.00	189.00	236.30	200.18	228.65	222.28	230.29	215.30
263.33	180.78	241.38	186.03	234.63	188.85	225.63	189.05	243.07	193.70	229.29	189.44	224.50	188.85	243.35	196.73	235.48	219.15	237.16	217.84
282.41	175.03	258.87	184.47	251.63	187.28	241.98	188.87	260.69	188.16	245.90	193.24	240.77	190.41	260.99	189.73	252.54	203.19	254.35	215.40
293.86	174.00	269.37	181.11	261.84	184.87	251.79	186.16	271.25	184.48	255.87	185.00	250.53	193.89	271.57	190.55	262.78	197.64	264.66	204.05
312.94	179.61	286.86	183.00	278.84	180.97	268.14	180.00	288.87	180.88	272.48	185.00	266.80	193.03	289.20	192.42	279.84	191.87	281.85	196.46
332.02	182.72	304.35	178.00	295.84	179.00	284.49	180.00	306.48	184.00	289.10	185.00	283.07	195.66	306.84	197.67	296.90	192.00	299.03	196.86
339.65	180.00	311.35	178.00	302.64	179.00	291.03	181.76	313.53	184.34	295.75	185.00	289.58	196.12	313.89	195.63	303.73	195.88	305.91	200.90
351.10	191.37	321.84	178.66	312.84	182.10	300.84	187.02	324.10	192.82	305.71	185.00	299.34	197.47	324.47	194.70	313.97	201.01	316.22	208.99
358.74	189.07	328.84	183.63	319.64	185.15	307.38	188.79	331.14	197.82	312.36	185.00	305.85	198.40	331.52	199.01	320.79	202.28	323.09	210.24
370.18	189.09	339.34	191.93	329.84	189.64	317.19	189.14	341.71	194.37	322.33	186.45	315.61	198.44	342.10	203.10	331.03	203.15	333.41	211.31
389.27	193.10	356.83	194.55	346.85	204.54	333.54	198.48	359.32	198.29	338.94	190.08	331.87	200.72	359.74	208.52	348.09	206.18	350.59	214.48
408.35	199.48	374.32	209.32	363.85	210.59	349.89	209.55	376.94	202.48	355.56	194.77	348.14	212.02	377.37	217.93	365.16	211.84	367.78	215.00
435.06	222.94	398.81	221.53	387.65	226.46	372.78	216.81	401.60	218.80	378.82	206.45	370.92	218.00	402.06	224.04	389.05	220.43	391.84	223.64
446.51	231.42	409.30	228.49	397.85	228.38	382.59	229.19	412.16	215.00	388.79	203.45	380.68	219.02	412.64	226.91	399.28	223.06	402.15	226.66
465.59	244.52	426.79	240.48	414.86	235.64	398.94	239.32	429.78	229.25	405.40	211.51	396.95	234.08	430.28	234.88	416.35	230.95	419.34	231.71
484.67	255.16	444.29	253.29	431.86	254.44	415.29	246.10	447.39	244.46	422.02	217.44	413.22	239.00	447.91	248.21	433.41	235.84	436.52	245.22
511.39	270.28	468.77	268.25	455.66	267.15	438.18	270.32	472.05	281.48	445.28	222.67	435.99	234.51	472.60	262.90	457.30	254.03	460.58	256.51
530.47	272.99	486.26	271.65	472.66	274.99	454.53	275.94	489.67	298.62	461.90	247.77	452.26	250.25	490.23	273.00	474.36	264.58	477.77	266.33
549.55	280.89	503.76	279.80	489.67	283.62	470.88	281.37	507.28	298.37	478.51	267.24	468.53	252.89	507.87	280.16	491.43	272.45	494.95	273.73
568.63	289.37	521.25	284.18	506.67	291.41	487.23	288.28	524.89	301.53	495.13	274.38	484.80	262.19	525.50	281.95	508.49	280.79	512.14	280.64
599.16	302.66	549.23	299.36	533.87	309.64	513.39	287.04	553.08	301.68	521.71	291.63	510.83	288.14	553.72	284.79	535.79	294.12	539.64	291.62
618.25	302.05	566.73	306.38	550.87	315.35	529.74	303.97	570.69	304.89	538.32	302.17	527.10	298.23	571.35	298.93	552.86	301.90	556.82	298.49
625.88	301.59	573.72	312.16	557.67	317.93	536.28	310.09	577.73	307.89	544.97	305.18	533.60	302.36	578.40	305.27	559.68	304.66	563.70	301.32
651.32	302.51	597.04	323.74	580.34	325.00	558.08	324.67	601.22	321.76	567.12	322.17	555.29	320.69	601.92	322.29	582.43	319.90	586.61	310.00

Lampiran Tabel 3. Data *Cross Section* Sungai RS 21-30

RS 21		RS 22		RS 23		RS 24		RS 25		RS 26		RS 27		RS 28		RS 29		RS 30	
Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation
0.00	290.00	0.00	291.39	0.00	288.98	0.00	289.57	0.00	295.00	0.00	294.94	0.00	294.86	0.00	294.31	0.00	295.00	0.00	295.00
6.08	288.07	5.43	288.45	5.11	287.90	4.73	284.89	4.40	291.01	4.62	290.70	4.39	294.54	4.22	292.86	4.37	293.41	4.01	294.05
12.15	285.08	10.86	286.55	10.23	285.82	9.46	288.19	8.81	287.83	9.23	287.90	8.77	294.09	8.45	290.84	8.74	290.55	8.02	292.26
21.26	281.57	19.01	284.03	17.90	282.10	16.55	289.56	15.41	283.48	16.15	286.18	15.36	293.12	14.78	288.88	15.30	285.96	14.04	288.10
27.34	279.42	24.44	280.36	23.01	279.43	21.28	287.82	19.82	280.39	20.77	286.96	19.74	292.27	19.01	288.14	19.67	283.47	18.05	285.00
36.45	276.11	32.59	272.59	30.68	276.76	28.38	284.57	26.42	275.85	27.69	288.79	26.32	290.28	25.35	287.81	26.23	280.26	24.07	281.98
57.71	273.05	51.59	257.30	48.57	269.86	44.93	276.27	41.83	266.63	43.85	286.53	41.68	282.58	40.13	282.81	41.52	268.83	38.12	273.38
66.83	270.94	59.74	260.53	56.24	266.19	52.03	272.54	48.44	261.63	50.77	283.44	48.26	276.67	46.47	275.44	48.08	265.63	44.13	268.42
72.90	268.28	65.17	259.44	61.36	263.82	56.76	270.12	52.84	256.89	55.39	281.18	52.65	271.65	50.69	270.71	52.45	262.45	48.15	266.00
82.02	262.46	73.32	257.57	69.03	259.99	63.85	266.57	59.45	249.36	62.31	277.56	59.23	261.72	57.03	256.07	59.01	255.41	54.16	263.27
97.20	257.50	86.90	254.66	81.81	253.71	75.67	259.30	70.46	240.56	73.85	270.44	70.20	249.10	67.59	246.24	69.93	245.59	64.19	260.26
103.28	256.39	92.33	251.49	86.92	250.01	80.40	253.73	74.86	238.03	78.46	267.25	74.58	246.38	71.81	243.96	74.31	244.51	68.21	257.80
118.47	253.28	105.90	242.61	99.70	241.67	92.23	242.09	85.87	233.66	90.00	255.22	85.55	241.14	82.37	240.62	85.23	250.08	78.24	250.05
127.58	250.51	114.05	238.07	107.37	237.67	99.32	236.39	92.47	230.97	96.93	243.85	92.13	237.26	88.71	235.88	91.79	254.71	84.25	243.55
142.77	245.48	127.63	231.06	120.15	231.39	111.15	228.17	103.48	226.69	108.46	236.29	103.10	230.61	99.27	229.61	102.72	245.71	94.28	230.53
157.95	239.21	141.20	220.80	132.94	221.88	122.97	221.56	114.49	218.33	120.00	228.30	114.07	226.09	109.83	224.99	113.64	235.79	104.31	226.12
173.14	233.73	154.78	209.54	145.72	212.28	134.80	210.08	125.50	213.66	131.54	222.06	125.03	221.61	120.39	218.04	124.57	226.78	114.34	223.92
188.33	227.91	168.36	207.76	158.50	208.00	146.62	209.00	136.51	212.60	143.08	217.52	136.00	218.25	130.95	217.00	135.50	222.03	124.37	222.12
203.52	205.39	181.94	206.00	171.28	208.00	158.44	209.00	147.52	212.97	154.62	214.95	146.97	217.00	141.51	217.00	146.42	219.93	134.40	219.93
209.59	198.47	187.37	206.00	176.40	208.00	163.17	209.00	151.92	213.95	159.23	214.15	151.36	216.90	145.73	217.00	150.79	219.00	138.42	219.00
224.78	197.42	200.95	206.35	189.18	210.61	175.00	211.51	162.93	219.41	170.77	213.37	162.33	218.55	156.29	219.96	161.72	219.00	148.45	219.00
233.89	197.41	209.09	206.92	196.85	211.19	182.09	217.87	169.53	221.08	177.70	213.68	168.91	219.81	162.63	221.94	168.28	219.00	154.46	219.18
249.08	206.48	222.67	212.65	209.63	227.09	193.92	227.99	180.54	224.34	189.24	219.83	179.87	222.65	173.19	224.55	179.21	221.27	164.49	221.93
264.27	215.82	236.25	221.14	222.41	237.18	205.74	233.05	191.55	231.50	200.77	226.53	190.84	226.92	183.75	230.64	190.13	224.00	174.52	227.07
270.34	219.03	241.68	222.99	227.53	238.59	210.47	235.29	195.95	235.57	205.39	228.60	195.23	229.47	187.97	231.36	194.50	223.98	178.54	229.16
279.46	223.37	249.82	227.08	235.20	241.40	217.56	238.68	202.56	239.39	212.31	229.50	201.81	232.92	194.31	235.07	201.06	226.45	184.55	232.37
285.53	225.00	255.25	229.07	240.31	243.23	222.29	241.24	206.96	241.58	216.93	230.94	206.20	235.15	198.53	236.87	205.43	227.61	188.57	234.42
294.65	225.00	263.40	233.03	247.98	246.03	229.39	245.11	213.57	243.04	223.85	234.81	212.78	239.71	204.87	239.33	211.99	231.90	194.58	238.56
309.83	226.33	276.98	240.00	260.76	250.58	241.21	251.46	224.58	247.45	235.39	243.54	223.75	246.30	215.43	244.93	222.91	239.73	204.61	244.25
325.02	229.55	290.56	240.03	273.54	253.29	253.04	256.64	235.59	250.23	246.93	251.20	234.71	250.28	225.99	249.23	233.84	243.75	214.64	249.11
346.28	239.47	309.56	240.46	291.44	254.40	269.59	261.72	251.00	251.09	263.08	258.87	250.07	255.04	240.77	254.36	249.14	251.86	228.69	256.49
355.40	240.93	317.71	243.77	299.11	253.68	276.68	264.20	257.60	257.68	270.01	261.04	256.65	255.53	247.11	255.82	255.69	254.97	234.71	259.88
370.58	245.58	331.29	247.97	311.89	258.29	288.51	266.99	268.61	265.91	281.54	263.45	267.62	255.77	257.67	257.39	266.62	260.05	244.74	264.58
385.77	253.38	344.87	254.62	324.67	263.48	300.33	270.78	279.62	272.11	293.08	268.97	278.58	255.03	268.23	258.97	277.55	263.94	254.77	266.76
407.04	265.96	363.87	266.69	342.57	271.40	316.89	273.75	295.03	279.69	309.24	272.86	293.94	260.31	283.01	267.04	292.85	267.32	268.81	265.00
422.22	272.52	377.45	273.72	355.35	278.10	328.71	279.94	306.04	284.70	320.78	270.47	304.91	267.71	293.58	275.92	303.77	270.07	278.84	267.97
437.41	277.45	391.03	280.05	368.13	284.98	340.54	286.12	317.05	289.58	332.32	272.11	315.88	276.23	304.14	282.77	314.70	274.91	288.87	274.29
452.60	282.45	404.61	286.51	380.92	291.87	352.36	292.31	328.06	294.17	343.85	277.30	326.84	283.55	314.70	287.34	325.63	277.98	298.90	276.70
476.90	294.53	426.33	296.89	401.37	302.61	371.28	300.94	345.67	300.47	362.32	291.21	344.39	294.04	331.59	291.64	343.11	279.66	314.95	288.81
492.09	301.83	439.91	302.82	414.15	308.34	383.10	306.42	356.68	303.92	373.85	302.90	355.36	300.09	342.15	295.98	354.04	282.60	324.98	298.42
498.16	304.29	445.34	305.30	419.26	310.59	387.83	308.09	361.08	305.49	378.47	309.13	359.75	302.65	346.38	301.57	358.41	284.40	328.99	302.25
518.41	310.38	463.44	314.28	436.31	314.94	403.60	313.88	375.76	313.03	393.86	315.00	374.37	315.01	360.46	315.00	372.98	300.20	342.36	315.00

Lampiran Tabel 4. Data *Cross Section* Sungai RS 31-40

RS 31		RS 32		RS 33		RS 34		RS 35		RS 36		RS 37		RS 38		RS 39		RS 40	
Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation
0.00	292.38	0.00	293.93	0.00	292.44	0.00	294.63	0.00	294.56	0.00	295.00	0.00	292.55	0.00	292.84	0.00	269.32	0.00	293.35
4.29	290.06	3.93	291.09	3.92	289.61	3.71	292.02	3.28	291.90	2.73	294.06	1.53	291.28	1.45	291.90	1.19	267.51	1.42	291.92
8.58	288.19	7.87	288.93	7.84	287.42	7.43	289.57	6.55	287.73	5.47	292.69	3.05	289.88	2.91	291.10	2.38	265.15	2.85	290.72
15.01	286.73	13.76	286.63	13.72	284.86	13.00	287.14	11.46	283.28	9.57	290.79	5.34	283.60	5.09	289.87	4.16	263.00	4.98	288.71
19.30	285.74	17.70	285.45	17.64	284.46	16.71	285.50	14.74	279.58	12.30	288.47	6.86	281.23	6.54	287.91	5.35	261.54	6.41	287.47
25.74	282.58	23.60	284.42	23.53	283.69	22.28	282.54	19.65	276.22	16.40	279.41	9.15	277.81	8.72	282.67	7.13	259.42	8.54	285.64
40.75	263.71	37.36	281.18	37.25	278.74	35.28	271.37	31.12	256.83	25.97	240.40	14.49	272.22	13.81	257.15	11.29	253.93	13.53	282.22
47.18	245.66	43.26	276.47	43.13	274.91	40.85	265.97	36.03	247.84	30.07	240.04	16.78	268.69	15.99	249.85	13.07	251.87	15.66	280.32
51.47	237.48	47.19	269.38	47.05	271.51	44.56	263.30	39.30	240.69	32.80	239.74	18.30	265.24	17.45	246.26	14.26	250.50	17.09	279.07
57.91	239.17	53.09	246.67	52.93	265.36	50.14	259.31	44.22	235.00	36.90	239.51	20.59	258.49	19.63	243.02	16.04	250.00	19.22	277.64
68.63	240.11	62.92	230.00	62.74	264.83	59.42	255.53	52.40	235.00	43.73	242.10	24.40	246.98	23.26	240.05	19.01	250.00	22.78	274.45
72.92	234.97	66.85	230.00	66.66	265.00	63.13	253.52	55.68	235.00	46.47	247.74	25.93	246.44	24.72	240.00	20.20	249.94	24.21	273.39
83.64	238.92	76.68	230.00	76.46	252.70	72.42	237.85	63.87	235.29	53.30	250.00	29.74	245.72	28.35	240.00	23.17	249.32	27.77	271.09
90.08	251.52	82.58	230.00	82.34	239.17	77.99	230.00	68.78	235.00	57.40	250.00	32.03	244.70	30.53	240.00	24.96	249.13	29.90	269.58
100.80	245.27	92.41	232.32	92.14	230.00	87.27	236.16	76.97	238.03	64.23	250.00	35.84	243.86	34.16	240.61	27.93	248.33	33.46	266.30
111.52	225.01	102.25	235.98	101.95	230.00	96.56	233.43	85.16	240.86	71.07	250.00	39.65	242.44	37.80	241.72	30.90	247.25	37.02	263.16
122.25	224.89	112.08	238.86	111.75	230.00	105.84	230.38	93.34	245.27	77.90	250.00	43.46	240.69	41.43	244.84	33.87	246.12	40.58	259.53
132.97	223.70	121.91	241.15	121.55	230.00	115.12	233.79	101.53	246.47	84.73	251.17	47.28	240.00	45.07	246.27	36.84	245.01	44.14	257.30
143.69	222.06	131.74	240.60	131.35	231.03	124.41	243.06	109.72	246.82	91.57	258.31	51.09	240.00	48.70	248.22	39.81	244.25	47.70	255.48
147.98	221.44	135.67	240.37	135.27	230.42	128.12	244.77	113.00	247.21	94.30	261.23	52.61	240.00	50.16	249.02	41.00	244.13	49.13	254.86
158.70	221.55	145.50	238.09	145.08	230.00	137.41	245.32	121.18	248.48	101.13	266.49	56.43	240.00	53.79	250.47	43.97	243.82	52.69	253.46
165.14	222.08	151.40	236.17	150.96	230.00	142.98	244.91	126.10	249.45	105.23	269.27	58.72	240.00	55.97	251.12	45.75	243.62	54.82	252.49
175.86	222.96	161.23	233.76	160.76	232.31	152.26	241.04	134.28	250.93	112.07	272.83	62.53	240.00	59.61	251.96	48.72	243.47	58.38	250.97
186.58	223.11	171.06	233.00	170.56	231.68	161.54	237.99	142.47	254.48	118.90	275.41	66.34	240.17	63.24	252.78	51.69	243.27	61.94	249.08
190.87	223.16	175.00	233.09	174.48	232.25	165.26	238.41	145.75	256.50	121.63	276.15	67.87	240.70	64.69	252.81	52.88	243.26	63.37	248.22
197.31	223.31	180.90	233.58	180.36	235.39	170.83	239.44	150.66	257.88	125.73	277.35	70.15	241.87	66.88	252.87	54.66	243.16	65.50	246.24
201.60	223.46	184.83	233.81	184.29	238.84	174.54	240.52	153.94	257.60	128.47	278.03	71.68	242.52	68.33	253.00	55.85	243.07	66.93	245.41
208.03	223.89	190.73	234.45	190.17	242.63	180.11	241.81	158.85	257.08	132.57	279.03	73.97	243.83	70.51	253.24	57.63	242.90	69.06	244.56
218.75	228.23	200.56	238.25	199.97	245.25	189.40	242.25	167.04	252.79	139.40	279.53	77.78	245.74	74.14	252.52	60.61	242.60	72.62	244.41
229.48	232.00	210.39	241.62	209.77	245.49	198.68	245.37	175.23	249.79	146.24	278.81	81.59	249.78	77.78	251.42	63.58	242.28	76.18	244.78
244.49	238.85	224.15	244.90	223.50	245.28	211.68	247.83	186.69	247.77	155.80	277.43	86.93	253.35	82.87	254.10	67.74	242.00	81.17	245.00
250.92	242.18	230.05	245.75	229.38	245.44	217.25	248.91	191.60	248.14	159.90	276.81	89.22	254.52	85.05	255.32	69.52	242.00	83.30	245.00
261.65	246.05	239.88	247.05	239.18	247.05	226.53	249.90	199.79	250.41	166.74	274.44	93.03	257.74	88.68	261.16	72.49	242.00	86.86	245.00
272.37	249.14	249.71	248.64	248.98	248.67	235.82	249.70	207.98	253.72	173.57	271.74	96.84	261.83	92.32	263.36	75.46	242.00	90.42	247.17
287.38	256.64	263.48	251.10	262.70	250.94	248.82	250.75	219.44	262.01	183.14	265.37	102.18	266.90	97.40	265.98	79.62	242.82	95.41	250.54
298.11	262.84	273.31	253.87	272.51	251.38	258.10	255.67	227.63	266.50	189.97	262.28	105.99	270.06	101.04	268.18	82.59	243.38	98.97	254.70
308.83	265.73	283.14	262.07	282.31	256.56	267.38	269.32	235.82	268.14	196.80	265.39	109.80	272.65	104.67	270.55	85.56	244.20	102.53	259.26
319.55	266.96	292.97	271.90	292.11	270.74	276.67	275.00	244.01	270.13	203.64	268.73	113.62	274.06	108.31	272.82	88.53	249.78	106.09	262.44
336.71	275.94	308.70	290.57	307.80	285.02	291.52	287.50	257.11	278.37	214.57	272.59	119.72	276.36	114.12	275.50	93.28	260.55	111.78	267.74
347.43	286.92	318.53	294.00	317.60	293.93	300.81	299.61	265.29	284.02	221.40	276.23	123.53	277.81	117.76	277.10	96.25	266.05	115.34	271.28
351.72	291.85	322.47	294.00	321.52	297.45	304.52	300.00	268.57	287.88	224.14	278.81	125.05	278.54	119.21	277.70	97.44	268.35	116.77	272.80
366.02	311.49	335.57	291.60	334.59	300.00	316.90	300.00	279.49	300.00	233.25	279.97	130.14	280.00	124.06	279.66	101.40	275.02	121.51	277.80

Lampiran Tabel 5. Data Cross Section Sungai RS 41-50

RS 41		RS 42		RS 43		RS 44		RS 45		RS 46		RS 47		RS 48		RS 49		RS 50	
Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation
0.00	294.10	0.00	293.66	0.00	294.71	0.00	295.00	0.00	280.25	0.00	280.00	0.00	286.48	0.00	290.64	0.00	292.49	0.00	294.76
2.13	293.13	2.59	292.83	4.25	294.31	4.12	294.99	3.23	280.00	3.12	277.05	3.27	286.62	3.29	290.00	3.36	290.41	3.49	293.56
4.26	292.11	5.18	291.96	8.50	293.58	8.25	294.88	6.45	279.65	6.23	273.60	6.53	286.27	6.58	290.00	6.73	290.00	6.99	292.41
7.45	290.10	9.07	290.01	14.87	292.82	14.43	294.93	11.29	276.97	10.90	271.86	11.43	285.26	11.52	290.00	11.78	290.00	12.22	290.54
9.58	289.30	11.66	289.15	19.12	291.88	18.55	295.00	14.51	276.02	14.02	272.38	14.69	284.25	14.81	290.00	15.14	290.00	15.72	289.07
12.78	288.08	15.55	287.71	25.49	290.75	24.74	295.00	19.35	272.52	18.69	267.54	19.59	282.19	19.74	289.64	20.19	287.84	20.96	283.22
20.23	285.68	24.62	284.06	40.36	287.64	39.17	295.00	30.64	262.31	29.60	258.33	31.02	277.16	31.26	284.45	31.96	282.46	33.18	273.64
23.43	285.11	28.50	281.80	46.74	286.40	45.35	295.00	35.48	257.51	34.27	257.34	35.91	274.95	36.19	283.58	37.01	280.08	38.42	271.94
25.56	284.85	31.09	280.15	50.99	284.91	49.48	295.00	38.70	254.93	37.39	254.98	39.18	274.17	39.48	282.94	40.37	278.86	41.91	270.40
28.75	284.68	34.98	275.02	57.36	283.73	55.66	295.00	43.54	251.21	42.06	251.84	44.07	275.00	44.42	282.05	45.42	277.29	47.15	266.69
34.07	283.15	41.46	273.24	67.98	279.49	65.97	295.00	51.60	247.77	49.85	249.87	52.24	263.10	52.64	280.12	53.83	274.70	55.88	261.11
36.20	281.75	44.05	271.88	72.23	278.09	70.09	295.00	54.83	246.46	52.96	248.59	55.50	255.01	55.93	278.02	57.19	273.08	59.38	258.84
41.53	279.27	50.53	268.18	82.85	275.00	80.40	294.88	62.89	241.61	60.75	242.86	63.66	256.27	64.16	274.14	65.60	268.95	68.11	254.98
44.72	277.85	54.42	264.67	89.22	274.07	86.58	293.88	67.73	237.01	65.43	238.64	68.56	255.89	69.09	270.70	70.65	266.04	73.35	253.64
50.05	276.18	60.89	259.66	99.85	270.92	96.89	291.58	75.79	232.95	73.21	231.28	76.72	250.81	77.32	265.89	79.06	261.15	82.08	251.91
55.37	273.28	67.37	258.21	110.47	270.48	107.20	289.27	83.85	230.73	81.00	230.00	84.88	245.65	85.54	261.31	87.47	255.52	90.81	250.87
60.70	268.44	73.85	259.31	121.09	270.56	117.50	287.19	91.92	230.00	88.79	230.00	93.05	242.69	93.77	256.16	95.88	252.67	99.54	250.17
66.02	264.18	80.33	264.15	131.71	271.19	127.81	289.16	99.98	230.00	96.58	230.30	101.21	239.30	101.99	250.16	104.29	250.27	108.27	248.20
71.34	259.14	86.81	269.58	142.33	273.19	138.12	289.91	108.04	230.00	104.37	230.72	109.37	235.35	110.22	244.96	112.70	247.82	117.01	245.46
73.47	256.92	89.40	270.34	146.58	274.74	142.24	289.65	111.27	230.00	107.48	230.87	112.63	235.61	113.51	243.55	116.06	246.68	120.50	244.88
78.80	252.24	95.87	270.49	157.20	278.36	152.55	289.11	119.33	235.35	115.27	234.44	120.79	234.39	121.73	240.65	124.47	243.89	129.23	245.34
81.99	250.18	99.76	268.85	163.58	280.44	158.73	288.75	124.17	236.28	119.95	239.58	125.69	234.53	126.67	235.00	129.52	242.17	134.47	245.62
87.32	245.00	106.24	266.19	174.20	283.93	169.04	288.06	132.23	242.33	127.73	247.50	133.85	234.77	134.89	235.00	137.93	239.99	143.20	244.19
92.64	245.00	112.72	264.34	184.82	284.10	179.35	287.52	140.29	245.00	135.52	249.72	142.02	234.99	143.12	235.00	146.34	240.00	151.93	241.04
94.77	245.00	115.31	263.33	189.07	284.21	183.47	287.28	143.52	245.00	138.64	250.00	145.28	235.00	146.41	235.00	149.71	240.00	155.43	241.30
97.96	245.00	119.20	261.32	195.44	283.52	189.66	287.07	148.36	245.00	143.31	250.00	150.18	236.85	151.34	235.26	154.75	240.00	160.66	240.47
100.09	245.00	121.79	259.44	199.69	283.13	193.78	286.92	151.58	245.00	146.43	250.00	153.44	238.31	154.63	235.78	158.12	241.06	164.16	240.28
103.29	245.00	125.67	256.33	206.06	282.23	199.96	286.68	156.42	245.00	151.10	250.00	158.34	238.65	159.57	237.37	163.16	242.71	169.40	242.57
108.61	245.00	132.15	252.59	216.69	279.98	210.27	286.31	164.48	246.73	158.89	255.15	166.50	248.87	167.79	242.64	171.57	246.02	178.13	250.88
113.94	245.00	138.63	257.10	227.31	277.47	220.58	285.94	172.55	251.39	166.68	256.94	174.66	255.14	176.02	247.39	179.98	254.78	186.86	251.20
121.39	245.18	147.70	263.60	242.18	273.60	235.01	285.32	183.83	254.98	177.58	255.17	186.09	257.82	187.53	252.40	191.76	259.44	199.08	265.74
124.58	244.98	151.59	263.62	248.55	272.40	241.19	285.15	188.67	255.77	182.26	255.62	190.99	259.62	192.47	253.31	196.80	255.38	204.32	272.80
129.91	244.85	158.06	262.55	259.17	270.43	251.50	283.19	196.73	261.80	190.04	255.46	199.15	260.00	200.69	254.09	205.21	255.02	213.06	280.13
135.23	244.62	164.54	260.19	269.79	267.96	261.81	278.42	204.80	267.59	197.83	263.25	207.31	260.00	208.92	260.21	213.63	262.34	221.79	285.52
142.69	244.92	173.61	258.13	284.67	262.67	276.24	271.66	216.09	276.27	208.74	269.75	218.74	260.00	220.43	277.51	225.40	271.92	234.01	294.05
148.01	246.24	180.09	256.96	295.29	255.30	286.55	267.31	224.15	283.21	216.53	273.17	226.90	263.23	228.66	282.98	233.81	274.04	242.74	301.44
153.33	249.00	186.57	255.90	305.91	255.16	296.85	260.66	232.21	289.37	224.31	277.53	235.06	267.47	236.88	290.06	242.22	276.52	251.47	308.86
158.66	250.95	193.04	253.98	316.53	269.23	307.16	260.00	240.27	294.26	232.10	283.12	243.22	271.28	245.11	291.44	250.63	280.54	260.21	310.00
167.18	259.93	203.41	253.29	333.53	269.61	323.65	268.31	253.17	296.01	244.56	294.68	256.28	281.07	258.27	296.20	264.09	289.62	274.18	310.00
172.50	269.71	209.89	254.00	344.15	273.10	333.96	272.52	261.24	302.84	252.35	300.45	264.44	295.71	266.49	300.96	272.50	301.79	282.91	312.23
174.63	272.46	212.48	254.82	348.40	274.74	338.08	274.10	264.46	306.58	255.47	302.29	267.71	299.29	269.78	303.90	275.86	310.74	286.40	314.80
181.73	280.00	221.12	278.65	362.56	280.00	351.83	277.95	275.21	311.65	265.85	309.64	278.59	308.50	280.75	308.98	287.08	317.41	298.04	323.51

Lampiran Tabel 6. Data *Cross Section* Sungai RS 51-60

RS 51		RS 52		RS 53		RS 54		RS 55		RS 56		RS 57		RS 58		RS 59		RS 60	
Station	Elevation	Station	Elevation	Station	Elevation	Distance (	Elevation	Distance (	Elevation	Distance (	Elevation	Distance (	Elevation	Distance (	Elevation	Distance (	Elevation	Distance (	Elevation
0.00	295.00	0.00	294.96	0.00	294.99	0.00	290.81	0.00	286.10	0.00	284.25	0.00	280.00	0.00	280.00	0.00	280.00	0.00	278.96
3.27	295.00	3.13	294.58	2.80	292.87	2.55	291.07	2.47	285.46	2.38	280.00	2.06	280.00	1.26	280.00	0.98	280.00	0.76	278.33
6.54	294.78	6.25	292.46	5.60	290.68	5.10	290.00	4.94	285.00	4.76	279.76	4.12	280.00	2.52	279.55	1.96	279.42	1.51	277.69
11.44	294.04	10.94	290.00	9.81	289.65	8.92	290.00	8.64	285.00	8.33	278.46	7.21	279.23	4.42	278.89	3.42	278.71	2.65	276.74
14.71	292.72	14.07	290.00	12.61	289.14	11.47	290.00	11.11	285.00	10.71	277.59	9.27	278.37	5.68	278.46	4.40	278.00	3.40	276.11
19.61	289.68	18.76	287.71	16.81	288.45	15.30	290.00	14.82	283.61	14.28	276.27	12.36	277.39	7.57	277.80	5.86	277.07	4.54	275.44
31.04	278.92	29.71	282.56	26.61	287.60	24.22	288.87	23.46	278.28	22.61	272.96	19.56	274.79	11.99	276.32	9.29	275.55	7.19	275.16
35.94	274.34	34.40	280.89	30.82	286.71	28.04	286.02	27.16	271.90	26.19	271.64	22.65	273.60	13.88	275.34	10.75	275.39	8.32	275.12
39.21	271.23	37.52	281.10	33.62	286.09	30.59	284.04	29.63	267.39	28.57	270.77	24.71	272.85	15.15	274.74	11.73	275.30	9.08	275.09
44.11	265.91	42.21	281.51	37.82	284.65	34.42	281.19	33.34	264.42	32.14	269.40	27.80	271.86	17.04	273.88	13.19	275.21	10.21	275.05
52.28	255.17	50.03	280.91	44.82	282.59	40.79	271.14	39.51	261.35	38.09	267.21	32.95	271.29	20.19	271.21	15.64	275.32	12.10	275.02
55.55	254.70	53.16	280.19	47.63	281.55	43.34	266.33	41.98	259.80	40.47	266.30	35.01	271.87	21.46	270.23	16.62	275.52	12.86	275.00
63.72	253.55	60.97	272.36	54.63	276.27	49.71	260.55	48.15	258.09	46.42	264.83	40.16	272.65	24.61	270.00	19.06	275.69	14.75	275.00
68.62	253.05	65.66	264.63	58.83	270.92	53.53	258.33	51.85	257.47	49.99	264.39	43.25	272.86	26.50	270.00	20.52	275.75	15.89	275.00
76.79	252.12	73.48	257.94	65.83	262.04	59.91	255.41	58.03	257.26	55.94	264.12	48.40	273.14	29.66	270.00	22.97	275.86	17.78	275.00
84.96	253.59	81.30	256.33	72.84	257.60	66.28	255.06	64.20	256.85	61.89	263.71	53.54	273.11	32.81	270.00	25.41	275.98	19.67	275.00
93.13	253.88	89.12	254.76	79.84	255.14	72.65	255.32	70.37	256.30	67.84	262.14	58.69	272.89	35.97	270.00	27.85	276.07	21.56	275.00
101.30	253.14	96.93	253.26	86.85	254.46	79.03	255.46	76.55	255.83	73.79	259.88	63.84	272.27	39.12	270.00	30.30	276.18	23.45	275.00
109.47	252.56	104.75	252.04	93.85	252.83	85.40	254.60	82.72	255.98	79.74	260.08	68.99	271.33	42.28	270.00	32.74	276.32	25.34	275.00
112.73	252.10	107.88	251.60	96.65	252.06	87.95	252.26	85.19	256.00	82.13	260.29	71.05	270.97	43.54	270.00	33.72	276.35	26.10	275.00
120.90	250.91	115.69	249.88	103.65	249.71	94.32	249.80	91.36	256.00	88.08	260.41	76.20	269.88	46.70	270.00	36.16	276.44	27.99	275.00
125.81	250.23	120.38	246.57	107.86	247.12	98.15	249.80	95.07	256.85	91.65	260.00	79.29	269.08	48.59	270.00	37.63	278.08	29.12	275.00
133.97	247.86	128.20	245.00	114.86	245.00	104.52	249.97	101.24	258.50	97.60	260.07	84.44	268.54	51.75	270.00	40.07	279.20	31.01	275.00
142.14	245.25	136.02	245.00	121.86	245.00	110.89	250.00	107.41	260.24	103.55	263.97	89.58	267.72	54.90	270.80	42.51	279.67	32.90	276.22
145.41	244.70	139.14	245.00	124.67	245.00	113.44	250.42	109.88	260.81	105.93	264.47	91.64	267.33	56.16	271.40	43.49	279.92	33.66	277.01
150.31	244.19	143.83	245.00	128.87	245.00	117.27	251.93	113.59	264.45	109.50	264.96	94.73	266.89	58.06	272.56	44.96	280.54	34.80	278.19
153.58	244.29	146.96	247.62	131.67	245.57	119.81	253.32	116.05	267.02	111.88	265.77	96.79	266.53	59.32	273.26	45.94	280.66	35.55	278.97
158.48	244.22	151.65	252.03	135.87	249.24	123.64	254.32	119.76	269.59	115.45	266.63	99.88	266.49	61.21	274.45	47.40	280.90	36.69	279.77
166.65	246.98	159.47	256.59	142.87	252.08	130.01	261.01	125.93	273.73	121.40	267.41	105.03	267.48	64.37	276.36	49.84	281.77	38.58	280.19
174.82	250.38	167.29	258.88	149.88	255.47	136.38	267.32	132.10	276.83	127.35	268.69	110.18	268.43	67.52	277.86	52.29	283.03	40.47	281.29
186.26	250.97	178.23	257.88	159.68	268.02	145.31	273.37	140.75	279.71	135.68	271.01	117.39	270.82	71.94	279.75	55.71	284.46	43.12	282.60
191.16	255.01	182.92	259.11	163.89	272.61	149.13	275.13	144.45	280.09	139.25	272.53	120.47	271.82	73.83	280.53	57.17	285.16	44.25	283.16
199.33	266.54	190.74	261.33	170.89	275.52	155.50	278.08	150.62	281.45	145.21	274.76	125.62	273.32	76.99	281.75	59.62	286.24	46.14	284.09
207.50	280.48	198.55	269.03	177.89	276.88	161.88	280.63	156.80	282.21	151.16	276.97	130.77	275.03	80.14	283.10	62.06	287.15	48.03	285.03
218.93	284.78	209.50	279.96	187.70	278.86	170.80	283.40	165.44	283.90	159.49	279.93	137.98	278.84	84.56	286.80	65.48	288.45	50.68	286.39
227.10	287.87	217.32	283.26	194.70	278.98	177.17	286.66	171.61	285.70	165.44	281.75	143.13	281.15	87.71	289.33	67.93	289.36	52.57	287.59
235.27	293.91	225.13	287.03	201.71	281.63	183.55	291.00	177.79	291.11	171.39	283.49	148.28	283.45	90.87	294.98	70.37	291.34	54.46	288.81
243.44	302.61	232.95	293.25	208.71	284.02	189.92	294.60	183.96	293.94	177.34	286.19	153.42	286.84	94.02	301.71	72.81	296.54	56.35	290.03
256.51	311.37	245.46	308.24	219.91	294.02	200.12	300.46	193.84	299.05	186.86	294.11	161.66	296.10	99.07	310.18	76.72	305.03	59.38	292.51
264.68	316.19	253.27	315.78	226.92	304.93	206.49	309.33	200.01	307.52	192.81	302.67	166.81	306.89	102.23	315.19	79.16	309.62	61.27	296.30
267.95	317.37	256.40	317.05	229.72	311.11	209.04	312.81	202.48	310.85	195.19	309.69	168.87	310.95	103.49	317.49	80.14	310.56	62.03	297.57
278.84	323.95	266.82	323.44	239.06	323.12	217.54	324.57	210.71	320.91	203.13	323.81	175.73	325.00	107.70	324.39	83.40	312.68	64.55	300.24

Lampiran Tabel 7. Data *Inflow* Bulanan Sungai Keser Tahun 1976-1992

Tahun	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
Januari	7.87	5.70	3.70	4.17	2.86	1.61	3.04	2.92	3.02	1.59	2.74	1.76	2.27	2.29	3.04	5.13	3.34
Februari	8.15	6.36	4.69	5.36	3.41	2.88	4.44	4.60	3.18	1.88	2.08	2.93	2.91	3.86	4.44	3.82	4.43
Maret	7.19	6.76	4.18	4.58	2.14	2.46	3.31	2.93	2.04	1.73	1.41	2.93	2.46	3.11	3.31	2.90	2.85
April	6.46	6.11	3.54	4.60	1.91	1.88	2.80	3.07	1.86	1.03	0.92	1.21	1.38	3.40	2.80	3.61	3.77
Mei	5.45	4.11	4.05	4.22	1.19	2.01	1.72	3.25	1.51	0.70	0.76	0.78	0.93	2.99	1.72	2.34	2.07
Juni	5.37	4.03	6.50	3.32	1.12	1.34	1.62	2.42	1.36	0.86	1.67	0.84	1.45	2.79	1.62	1.59	1.82
Juli	4.98	3.72	5.51	2.62	0.99	3.91	1.42	1.45	1.22	0.62	1.07	0.66	0.82	2.38	1.42	1.45	1.47
Agustus	4.75	3.52	4.40	2.50	0.93	2.35	1.31	1.36	1.13	0.55	0.73	0.58	0.76	1.59	1.31	1.34	2.00
September	4.68	3.45	3.67	2.42	0.87	1.64	1.26	1.29	1.59	0.50	0.69	0.50	0.71	1.35	1.26	1.29	3.31
Oktober	4.55	3.17	3.31	2.21	0.78	1.61	1.12	1.66	1.26	0.62	0.74	0.40	1.39	1.51	1.12	1.14	5.10
Nopember	6.85	3.10	3.29	2.15	1.49	2.88	1.05	2.26	1.05	1.50	1.12	0.59	2.38	2.34	1.05	1.46	3.85
Desember	5.35	3.20	3.00	3.22	1.19	3.49	2.11	1.97	2.62	2.24	0.66	3.43	2.48	2.17	2.11	2.79	4.31
Total	71.65	53.23	49.84	41.37	18.88	28.06	25.20	29.18	21.84	13.82	14.59	16.61	19.94	29.78	25.20	28.86	38.32

Lampiran Tabel 8. Data *Inflow* Bulanan Sungai Keser Tahun 1993-2009

Tahun	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Rata-Rata
Januari	3.57	9.26	24.38	22.91	10.08	2.34	16.44	2.28	2.60	6.44	23.78	6.98	2.52	3.61	2.44	7.92	2.02	6.077
Februari	1.80	7.10	35.72	16.78	35.72	12.36	4.99	3.71	4.39	8.12	24.71	5.00	4.63	2.68	3.31	8.41	3.60	7.425
Maret	1.54	8.51	22.48	20.63	3.04	41.00	1.41	3.74	2.55	2.94	22.72	3.66	5.13	2.50	2.86	8.91	1.73	6.225
April	4.86	1.78	9.05	22.62	1.79	39.77	1.03	3.44	4.14	12.49	10.75	0.95	1.65	3.02	3.37	7.91	2.16	5.327
Mei	1.23	1.11	1.53	6.48	0.87	19.23	0.53	3.78	2.28	6.73	12.01	1.09	0.48	1.39	1.60	3.59	1.90	3.107
Juni	1.51	0.99	6.91	4.18	0.30	12.67	0.28	2.05	3.47	5.24	7.39	1.07	1.10	2.12	1.48	2.93	1.55	2.793
Juli	0.63	0.91	1.72	4.05	0.07	19.36	0.06	1.51	1.74	5.22	5.71	0.63	2.48	1.82	1.29	2.68	1.50	2.561
Agustus	0.77	0.90	0.18	2.88	0.06	15.13	0.03	1.40	1.57	4.68	4.67	0.45	0.33	1.64	1.44	2.68	1.43	2.099
September	0.98	0.96	0.04	1.85	0.08	13.98	0.01	1.35	1.50	4.38	4.35	0.45	0.40	1.45	1.38	2.49	1.32	1.984
Oktober	0.90	0.94	0.08	2.37	0.06	20.32	0.20	2.45	1.53	4.27	3.89	0.44	0.36	1.24	1.37	2.57	1.32	2.235
Nopember	2.61	1.22	9.21	4.64	0.09	28.27	8.89	2.94	1.90	4.21	5.90	1.96	0.38	0.97	1.92	6.02	1.16	3.550
Desember	3.07	1.31	2.79	5.89	1.39	27.99	4.89	2.16	1.39	4.21	9.34	7.07	6.66	1.89	4.42	3.47	0.44	3.962
Total	23.47	34.99	114.09	115.28	53.55	252.42	38.76	30.81	29.06	68.93	135.22	29.75	26.12	24.33	26.88	59.58	20.13	

Lampiran Tabel 9. Hasil Perhitungan Analitik Konsentrasi Sedimen

Tahun	Kedalaman Rata Rata		Luas Penampang Basah	Keliling Basah	Jari-jari Hidrolis	Debit		Debit/ Satuan Lebar		Kecepatan	Koef Manning	Kecepatan geser	Angka Re	Tegangan Geser	τ^*	Tegangan Geser Kritis	U^*/ω	$f(U^*/\omega)$	Konsentrasi Sedimen (Ct)		
	m	ft	ft ²	ft	ft	m ³ /s	ft ³ /s	(m ³ /s)/m	(ft ³ /s)/m	ft/s		ft/s		lb/ft ²		lb/ft ²			lb/ft ³	kg/m ³	ppm (mg/l)
1976	0.571	1.874	894.878	481.021	1.860	71.650	2530.296	0.494	5.319	2.828	0.030	0.443	24.424	0.587	0.035	0.00225	0.4998	10	0.138	2.217	2217.022
1977	0.474	1.554	741.817	480.118	1.545	53.230	1879.800	0.367	3.951	2.534	0.030	0.403	22.245	0.502	0.035	0.00225	0.4552	10	0.147	2.355	2355.450
1978	0.455	1.494	713.090	479.948	1.486	49.840	1760.083	0.344	3.700	2.468	0.030	0.395	21.811	0.482	0.034	0.00218	0.4463	10	0.148	2.370	2370.238
1979	0.408	1.337	637.847	479.504	1.330	41.370	1460.968	0.285	3.071	2.290	0.030	0.374	20.632	0.431	0.034	0.00218	0.4222	10	0.150	2.410	2410.212
1980	0.255	0.837	398.768	478.089	0.834	18.880	666.741	0.130	1.402	1.672	0.030	0.296	16.322	0.268	0.032	0.00205	0.3340	9	0.145	2.328	2327.523
1981	0.323	1.058	504.648	478.716	1.054	28.060	990.930	0.194	2.083	1.964	0.030	0.333	18.357	0.342	0.033	0.00212	0.3756	9	0.141	2.260	2260.466
1982	0.303	0.993	473.572	478.532	0.990	25.200	889.930	0.174	1.871	1.879	0.030	0.322	17.784	0.320	0.033	0.00212	0.3639	9	0.142	2.276	2275.884
1983	0.330	1.084	516.854	478.788	1.080	29.180	1030.482	0.201	2.166	1.994	0.030	0.337	18.577	0.350	0.033	0.00212	0.3801	9	0.140	2.249	2248.860
1984	0.278	0.911	434.230	478.299	0.908	21.840	771.272	0.151	1.621	1.776	0.030	0.309	17.031	0.294	0.033	0.00212	0.3485	9	0.144	2.314	2313.724
1985	0.211	0.692	329.891	477.680	0.691	13.820	488.049	0.095	1.026	1.479	0.030	0.269	14.848	0.224	0.032	0.00205	0.3038	9	0.151	2.417	2416.710
1986	0.218	0.716	341.020	477.746	0.714	14.585	515.064	0.101	1.083	1.510	0.030	0.274	15.096	0.231	0.032	0.00205	0.3089	9	0.150	2.397	2397.431
1987	0.236	0.775	369.272	477.914	0.773	16.610	586.577	0.115	1.233	1.588	0.030	0.285	15.707	0.249	0.032	0.00205	0.3214	9	0.147	2.355	2355.418
1988	0.263	0.863	411.132	478.162	0.860	19.940	704.175	0.138	1.480	1.713	0.030	0.300	16.572	0.279	0.032	0.00205	0.3391	9	0.146	2.334	2333.972
1989	0.334	1.097	522.882	478.823	1.092	29.780	1051.671	0.205	2.211	2.011	0.030	0.339	18.685	0.355	0.033	0.00212	0.3823	9	0.140	2.249	2249.413
1990	0.303	0.993	473.572	478.532	0.990	25.200	889.930	0.174	1.871	1.879	0.030	0.322	17.784	0.320	0.033	0.00212	0.3639	9	0.142	2.276	2275.884
1991	0.328	1.077	513.711	478.769	1.073	28.860	1019.181	0.199	2.142	1.984	0.030	0.336	18.521	0.347	0.033	0.00212	0.3790	9	0.140	2.247	2247.111
1992	0.389	1.275	608.375	479.329	1.269	38.320	1353.258	0.264	2.845	2.224	0.030	0.365	20.151	0.413	0.034	0.00218	0.4123	10	0.152	2.439	2439.280
1993	0.290	0.953	454.233	478.417	0.949	23.470	828.835	0.162	1.742	1.825	0.030	0.316	17.418	0.306	0.033	0.00212	0.3564	9	0.143	2.283	2283.282
1994	0.368	1.208	576.252	479.139	1.203	34.990	1235.660	0.241	2.597	2.144	0.030	0.356	19.613	0.391	0.033	0.00212	0.4013	10	0.153	2.458	2457.714
1995	0.749	2.459	1175.618	482.676	2.436	114.090	4029.051	0.787	8.469	3.427	0.030	0.507	27.977	0.787	0.035	0.00225	0.5725	11	0.149	2.386	2386.042
1996	0.755	2.477	1184.514	482.728	2.454	115.280	4071.075	0.795	8.558	3.437	0.030	0.509	28.082	0.790	0.035	0.00225	0.5746	11	0.148	2.373	2372.797
1997	0.483	1.583	755.728	480.200	1.574	53.550	1891.101	0.369	3.975	2.502	0.031	0.407	22.452	0.486	0.035	0.00225	0.4594	10	0.139	2.234	2233.669
1998	1.207	3.960	1899.419	486.922	3.901	252.420	8914.129	1.741	18.738	4.693	0.030	0.644	35.506	1.260	0.038	0.00244	0.7265	13	0.162	2.590	2589.607
1999	0.394	1.291	615.967	479.374	1.285	38.763	1368.903	0.267	2.878	2.222	0.030	0.368	20.276	0.410	0.034	0.00218	0.4149	10	0.149	2.390	2390.024
2000	0.341	1.119	533.591	478.887	1.114	30.810	1088.045	0.212	2.287	2.039	0.030	0.342	18.875	0.362	0.033	0.00212	0.3862	9	0.140	2.243	2243.221
2001	0.330	1.081	515.498	478.780	1.077	29.060	1026.244	0.200	2.157	1.991	0.030	0.336	18.553	0.349	0.033	0.00212	0.3796	9	0.141	2.251	2250.951
2002	0.554	1.817	867.558	480.860	1.804	68.930	2434.240	0.475	5.117	2.806	0.030	0.436	24.050	0.584	0.035	0.00225	0.4921	10	0.143	2.287	2286.632
2003	0.830	2.724	1303.342	483.427	2.696	135.220	4775.250	0.933	10.038	3.664	0.030	0.534	29.449	0.870	0.035	0.00225	0.6026	12	0.159	2.551	2551.267
2004	0.335	1.099	524.182	478.831	1.095	29.750	1050.611	0.205	2.208	2.004	0.030	0.339	18.708	0.352	0.033	0.00212	0.3828	9	0.139	2.225	2225.370
2005	0.312	1.024	488.174	478.618	1.020	26.120	922.419	0.180	1.939	1.890	0.031	0.327	18.055	0.320	0.033	0.00212	0.3695	9	0.137	2.199	2198.775
2006	0.296	0.972	463.345	478.471	0.968	24.330	859.206	0.168	1.806	1.854	0.030	0.319	17.591	0.314	0.033	0.00212	0.3600	9	0.143	2.289	2289.453
2007	0.315	1.032	492.105	478.641	1.028	26.880	949.258	0.185	1.995	1.929	0.030	0.329	18.128	0.333	0.033	0.00212	0.3709	9	0.141	2.265	2264.773
2008	0.507	1.664	794.224	480.427	1.653	59.580	2104.048	0.411	4.423	2.649	0.030	0.417	23.014	0.536	0.035	0.00225	0.4709	10	0.145	2.325	2325.257
2009	0.265	0.868	413.873	478.178	0.866	20.130	710.884	0.139	1.494	1.718	0.030	0.301	16.627	0.280	0.032	0.00205	0.3402	9	0.145	2.324	2324.074

Lampiran Tabel 10. Perbandingan Angkutan Sedimen

Tahun	Konsentrasi Sedimen (ppm)		Konsentrasi Sedimen (kg/m ³)		Debit (m ³ /s)	Qt, Debit Angkutan Sedimen (kg/s)		qt, Debit Angkutan Sedimen/lebar (kg/s)		Angkutan Sedimen (ton)	
	Pemodelan HEC-RAS	Perhitungan Analitik	Pemodelan HEC-RAS	Perhitungan Analitik		Pemodelan HEC-RAS	Perhitungan Analitik	Pemodelan HEC-RAS	Perhitungan Analitik	Pemodelan HEC-RAS	Perhitungan Analitik
1976	2,063.46	2,217.02	2.063	2.217	71.65	147.847	158.850	1.020	1.096	32,155.11	34,548.14
1977	2,770.33	2,355.45	2.770	2.355	53.23	147.465	125.381	1.017	0.865	32,072.08	27,268.98
1978	2,963.37	2,370.24	2.963	2.370	49.84	147.694	118.133	1.019	0.815	32,122.00	25,692.63
1979	2,793.19	2,410.21	2.793	2.410	41.37	115.554	99.710	0.797	0.688	25,131.88	21,686.00
1980	3,162.94	2,327.52	3.163	2.328	18.88	59.716	43.944	0.412	0.303	12,987.67	9,557.29
1981	3,167.27	2,260.47	3.167	2.260	28.06	88.873	63.429	0.613	0.437	19,329.06	13,795.08
1982	1,567.94	2,275.88	1.568	2.276	25.2	39.512	57.352	0.272	0.396	8,593.45	12,473.53
1983	3,140.71	2,248.86	3.141	2.249	29.18	91.646	65.622	0.632	0.453	19,932.01	14,272.05
1984	3,165.56	2,313.72	3.166	2.314	21.84	69.136	50.532	0.477	0.348	15,036.31	10,990.13
1985	3,161.04	2,416.71	3.161	2.417	13.82	43.686	33.399	0.301	0.230	9,501.15	7,263.92
1986	3,164.07	2,397.43	3.164	2.397	14.585	46.148	34.967	0.318	0.241	10,036.71	7,604.86
1987	3,160.30	2,355.42	3.160	2.355	16.61	52.493	39.123	0.362	0.270	11,416.59	8,508.96
1988	3,160.76	2,333.97	3.161	2.334	19.94	63.025	46.539	0.435	0.321	13,707.39	10,121.84
1989	3,165.69	2,249.41	3.166	2.249	29.78	94.274	66.988	0.650	0.462	20,503.68	14,569.09
1990	3,150.92	2,275.88	3.151	2.276	25.2	79.403	57.352	0.548	0.396	17,269.35	12,473.53
1991	3,117.48	2,247.11	3.117	2.247	28.86	89.970	64.852	0.620	0.447	19,567.64	14,104.56
1992	3,098.27	2,439.28	3.098	2.439	38.32	118.726	93.473	0.819	0.645	25,821.65	20,329.45
1993	3,131.53	2,283.28	3.132	2.283	23.47	73.497	53.589	0.507	0.370	15,984.83	11,654.97
1994	2,884.64	2,457.71	2.885	2.458	34.99	100.933	85.995	0.696	0.593	21,951.97	18,703.11
1995	2,257.78	2,386.04	2.258	2.386	114.09	257.590	272.224	1.776	1.877	56,023.15	59,205.80
1996	2,017.18	2,372.80	2.017	2.373	115.28	232.540	273.536	1.604	1.886	50,575.14	59,491.25
1997	2,741.27	2,233.67	2.741	2.234	53.55	146.795	119.613	1.012	0.825	31,926.42	26,014.58
1998	344.70	2,589.61	0.345	2.590	252.42	87.009	653.669	0.600	4.508	18,923.52	14,216.15
1999	2,963.05	2,390.02	2.963	2.390	38.763	114.857	92.645	0.792	0.639	24,980.11	20,149.22
2000	3,168.88	2,243.22	3.169	2.243	30.81	97.633	69.114	0.673	0.477	21,234.18	15,031.50
2001	3,153.22	2,250.95	3.153	2.251	29.06	91.633	65.413	0.632	0.451	19,929.14	14,226.57
2002	2,458.00	2,286.63	2.458	2.287	68.93	169.430	157.618	1.168	1.087	36,849.29	34,280.19
2003	1,612.21	2,551.27	1.612	2.551	135.22	218.003	344.982	1.503	2.379	47,413.37	65,030.10
2004	2,935.78	2,225.37	2.936	2.225	29.75	87.339	66.205	0.602	0.457	18,995.40	14,398.85
2005	2,987.85	2,198.78	2.988	2.199	26.12	78.043	57.432	0.538	0.396	16,973.48	12,490.87
2006	3,166.16	2,289.45	3.166	2.289	24.33	77.033	55.702	0.531	0.384	16,753.80	12,114.69
2007	3,148.65	2,264.77	3.149	2.265	26.88	84.636	60.877	0.584	0.420	18,407.37	13,240.14
2008	2,559.19	2,325.26	2.559	2.325	59.58	152.476	138.539	1.052	0.955	33,162.06	30,130.76
2009	3,162.83	2,324.07	3.163	2.324	20.13	63.668	46.784	0.439	0.323	13,847.10	10,174.95
Laju Sedimentasi (ton/th)										23,209.24	20,465.11
m ³ /th										21,999.28	19,398.21

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kediri, 21 Februari 1995 merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Pertiwi I (Nganjuk), SDN Sumberkepuh III (Nganjuk), SMP Negeri 1 Tanjunganom (Nganjuk), SMA Negeri 2 Kediri (Kediri). Setelah lulus dari SMAN 2 Kediri tahun 2013, Penulis mengikuti ujian masuk Perguruan Tinggi Negeri melalui jalur SBMPTN dan diterima di Teknik Sipil ITS pada tahun 2013 dan terdaftar dengan NRP 3113100090.

Di Jurusan Teknik Sipil ini Penulis mengambil Bidang Studi Hidroteknik. Penulis pernah aktif dalam beberapa kegiatan seminar, kepanitian, kepenulisan dan organisasi yang ada selama menjadi mahasiswa baik yang diadakan oleh HMS, LDJ Al Hadiid, Jurusan, Institut, maupun kegiatan yang bersifat nasional. Bagi pembaca yang ingin menghubungi penulis bisa melalui surat elektronik dengan alamat faradillashiami@gmail.com.